



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Pokročilé řízení pohonu elektricky asistovaného kočárku

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

Autor práce: **Bc. Ondřej Mach**

Vedoucí práce: Ing. Pavel Jandura, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

Advanced motor control of electrically assisted baby carriage

Diploma thesis

Study programme: N2612 – Electrical Engineering and Informatics

Study branch: 3906T001 – Mechatronics

Author: **Bc. Ondřej Mach**

Supervisor: Ing. Pavel Jandura, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Mach**
Osobní číslo: **M14000204**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Mechatronika**
Název tématu: **Pokročilé řízení pohonu elektricky asistovaného kočárku**
Zadávající katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**


Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. V návaznosti na předchozí práce realizujte prototyp měniče pro dvojici trakčních BLDC elektromotorů elektricky asistovaného kočárku.
2. Navrhněte vhodný koncept řídicího systému pohonu kočárku.
3. Měniče a vlastní řídicí systém otestujte na prototypu kočárku.


Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: cca 40–50 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- [1] MACH Ondřej, Třífázový můstek pro řízení BLDC motorů, Semestrální projekt, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Technická univerzita v Liberci
- [2] HAJIČ, Jan. Pohonné synchronní elektromotory: díly 1-7. RC revue: nezávislý modelářský měsíčník. Praha: Tora - Tomáš Sládek, 2000, (1-7/2001). ISSN 1213-130x.
- [3] BROWN, Ward. MICROCHIP TECHNOLOGY INC. Brushless DC Motor Control Made Easy: AN857. AZ, USA, 2002. Dostupné z: ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00857a.pdf

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Jandura**
Ústav mechatroniky a technické informatiky
Konzultant diplomové práce: **Ing. Dmitry Kochubey**
Ústav mechatroniky a technické informatiky
Datum zadání diplomové práce: **10. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje Do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Touto cestou bych velmi rád poděkoval především vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Pavlu Jandurovi, Ph.D., za cenné rady odborného charakteru, pomoc při celkovém zpracování textu, ale také i za zprostředkovávání výroby desek plošných spojů, včetně nákupu potřebných elektronických součástek. Významné poděkování patří dále i mým rodičům za jejich neocenitelnou podporu po celou dobu studia.

Tato práce byla podpořena Studentskou grantovou soutěží Technické univerzity v Liberci.

Anotace

Cílem práce je návrh a realizace pokročilého řízení pohonu elektricky asistovaného kočárku. Úlohu lze principiálně kategorizovat na dvě dílčí nezávislé části - elektroniku výkonového třífázového můstku a centrální řídicí jednotku vybavenou odpovídajícím softwarem. Třífázový můstek slouží pro dynamické (pulzně šířkově modulované) ovládání bezkartáčových stejnosměrných motorů. Realizace vychází z výkonové části založené na unipolárních tranzistorech, jejich budičích zastávajících roli virtuální plovoucí země a dále doprovodných, zejména ochranných obvodů. Dvoupřenosová řídicí jednotka zpracovává implementovanými algoritmy signály šesti Hallových senzorů BLDC motorů, na základě kterých generuje v interakci s uživatelskými pokyny odpovídající sdružené PWM signály. Princip pokročilého řízení pohonu vyžaduje plnou kontrolu nad okolním terénem, kterou v reálném čase zprostředkovává tříosý digitální akcelerometr. Centrální řídicí jednotka obohacuje aplikaci nad rámec zadání možností záznamu provozních dat na multimediální Micro SD kartu, servisní USB komunikaci a bezdrátovým připojením prostřednictvím integrovaného bluetooth modulu. Hlavními problémy práce se jeví jednak mechanické provedení celého systému s ohledem na potenciálně vysoké teploty výkonových spínacích prvků, problematika elektromagnetické kompatibility doprovodných řídicích obvodů, proudové dimenzování, softwarové vybavení ale také i vhodné, robustní navržení schématu.

Klíčová slova

Řízení bezkartáčových motorů, výkonová / řídicí jednotka, třífázový můstek, ochranné prvky

Annotation

The objective of this work is the design and implementation of advanced traction control of an electrically assisted wheelchair. The task can generally be divided into two independent parts - the first part dealing with electronics of a three-phase bridge and the second part dealing with a central control unit equipped with appropriate software. The three-phase bridge is used for dynamic (pulse width modulated) control of brushless DC motors. The implementation is based on a performance part based on unipolar transistors, their exciters taking on the role of virtual floating ground and auxiliary circuits, i.e. protective circuits. Using algorithms implemented in this work, a dual processor control unit processes the signals of six Hall sensors of the BLDC motors, and interacting with user commands, it generates the PWM signals associated with the Hall sensor signals. The principle of advanced propulsion control requires full control over the surrounding terrain, which is provided by a three-axis digital accelerometer in real time. The central control unit enriches the application beyond the scope of the assignment, containing an option to store recorded operational data to a multimedia micro SD card, as well as having an USB communication service and wireless connectivity via an integrated Blue-tooth module. The main problem of the work shows to be not only the mechanical design of the entire system with regard to the potentially high temperatures of the wattage switching elements, electromagnetic compatibility problems of the auxiliary control circuits, current dimensioning and software equipment but also an appropriate and robust schematic design.

Key words

Brushless motor control, power / control unit, three-phase bridge, protective elements

Obsah

Seznam tabulek	8
Seznam obrázků	9
Seznam použitých veličin a jednotek	10
Seznam zkratk a použitých výrazů	11
Úvod	13
Vstupní technické parametry	13
1. Bezkomutátorové stejnosměrné motory	15
2. Napájecí akumulátory	17
2.1. Lithium-Ion polymerové články	17
3. Teorie řízení	19
3.1. Šestikroková komutace	19
3.2. Sinusová komutace... ..	20
3.3. Vektorové řízení	21
3.4. Módy spínání	22
4. Návrh třífázového můstku	24
4.1. Bezjiskřící připojování	24
4.2. Napájecí část, kombinace stabilizátorů	26
4.3. Výkonové spínací prvky	28
4.4. Buzení mosfetů, virtuální plovoucí zem	29
4.5. Ochranné a doprovodné řídicí prvky	31
4.6. Návrh plošného spoje	34
5. Návrh centrální řídicí jednotky	36
5.1. Napájení - DC/DC měnič	37
5.2. Třiosý akcelerometr pro mapování terénu	38
5.3. Přednostní aspekty volby procesoru	39
5.3.1 Signálový procesor dsPIC	41
5.4. Význam a vyhodnocení vstupních signálů	43
5.4.1 Funkce procesoru PIC16	45
5.5. Komunikační a záznamové periferie	46
6. Softwarová vybava	47
6.1. Dekódování Grayova kódu	47
6.2. Algoritmus procesoru PIC16	49

6.3. Konfigurace vnitřních struktur dsPIC	50
6.3.1 Topologie I/O.....	50
6.3.2 Konfigurace, inicializace SPI	51
6.3.3 Konfigurace, inicializace I ² C.....	52
6.3.4 Konfigurace, inicializace UART	52
6.3.5 Konfigurace, Inicializace PWM	53
6.3.6 Konfigurace, inicializace ADC	54
6.3.7 Konfigurace externích přerušení	54
6.4. Centrální řídicí software	55
Závěr.....	58
Seznam použité literatury.....	59
Grafické přílohy diplomové práce.....	61

Seznam tabulek

Obrázek 0.1 - Technické parametry BLDC motoru HL10G motor	14
Tabulka 2.1 - Důležitá napětí pouch LCO článků	18
Tabulka 3.1 - LUT tabulka šestikrokové komutace	20
Tabulka 3.2 - Srovnání metod elektronických komutací	22
Tabulka 4.1 - Proudové náročnosti elektroniky třífázových můstků	27
Tabulka 4.2 - Průřezy měděných cest DPS pro plátování 18 a 35 μm	32
Tabulka 4.3 - Výpočet odporů a úbytků z délek měděných cest DPS	32
Tabulka 5.1 - Proudové náročnosti elektroniky řídicí jednotky.....	37
Tabulka 5.2 - Kapacitní a časové spínací parametry mosfetu BSC034N	40
Tabulka 6.1 - Dostupné funkce knihoven pro práci s SPI v MikroC	51

Seznam obrázků

Obrázek 0.1 - Mechanická konstrukce kočárku	14
Obrázek 1.1 - Vnitřní struktura BLDC motorů	15
Obrázek 1.2 - Třífázové zapojení statorových cívek	16
Obrázek 2.1 - Vnitřní struktura propojování článků Li-Ion accupacků	18
Obrázek 3.1 - Ucelený koncept třífázového měniče, ovládání fází	19
Obrázek 3.2 - Blokový regulátor vektorového řízení.....	21
Obrázek 3.3 - Clarkova a Parkova transformační matice, význam vektorů.....	22
Obrázek 3.4 - H-můstek, topologie dvoufázového střídače	23
Obrázek 4.1 - Výsledná funkční verze třífázových můstků	24
Obrázek 4.2 - Bezjiskřící propojení	25
Obrázek 4.3 - Elektronický antispark circuit s exponenciálním náběhem	25
Obrázek 4.4 - Schéma spínaného stabilizátoru s regulátorem MCP16301	26
Obrázek 4.5 - Schéma třífázového můstku s N kanálovými mosfety	28
Obrázek 4.6 - Schéma budiče mosfetů s IR2101 (virtuální plovoucí zem)	29
Obrázek 4.7 - Závislost maximálního proudu I_D na napětí U_{GS} a U_{DS}	30
Obrázek 4.8 - Měření vazby mezi úbytkem na bočníku a výstupním napětím - INA213	31
Obrázek 4.9 - Schéma struktury komparátorů ochranných prvků	33
Obrázek 4.10 - Poměrná změna kapacit MLCC kondenzátorů v závislosti na teplotě.....	35
Obrázek 5.1 - Výsledná funkční verze centrální řídicí jednotky.....	35
Obrázek 5.2 - Obecný časový průběh spínání mosfetů.....	41
Obrázek 5.3 - Technická specifikace dsPIC33EP256MU810	42
Obrázek 5.4 - Rozmístění a význam konektorů centrální řídicí jednotky.....	43
Obrázek 6.1 - Blokové schéma dekodování Grayova kódu	48
Obrázek 6.2 - Princip „remapovatelnosti“ pinů	50
Obrázek 6.3 - Ukázka příkazu inicializace SPI v MikroC pro dsPIC	51
Obrázek 6.4 - Zjednodušené blokové schéma softwarového algoritmu řídicí jednotky	56

Seznam použitých veličin a jednotek

Veličina	Jednotka	Popis významu
C_{ISS}	F	Kapacitní vazba vstupní elektrody Gate mosfetu
C_{IN}	F	Vstupní kapacita
C_{OUT}	F	Výstupní kapacita
f_{PWM}	Hz	Frekvence PWM modulace
G	$m \cdot s^{-2}$	Tíhové gravitační zrychlení
I_D	A	Proud do elektrody Drain mosfetu
I_{DM}	A	Maximální dosažitelný (špičkový) proud na svorce Drain
I_{GS}	A	Vnitřní proud mezi svorkami Gate-Source
I_{MAX}	A	Maximální proud
l_{Cu}	m	Efektivní délka měděné cesty na desce plošných spojů
L	H	Indukčnost cívky
P_{FET}	W	Výkon mosfetu
P_{MAX}	W	Maximální výkon
P_{tot}	W	Maximální dosažený výkon
$R_{DS(on)}$	Ω	Odpor mezi svorkami Drain-Source v sepnutém stavu
$R_{G,ext}$	Ω	Externí vstupní odpor svorky Gate mosfetu
R_{V20}	Ω	Nominální odpor při 20 °C
S_{Cu}	m^2	Průřez měděné cesty na desce plošných spojů
t_d	s	Prodleva při uzavírání mosfetu
t_r	s	Prodleva při otevírání mosfetu
t_f	s	Doba náběhu / sestupu otevírání / uzavírání
T_j	°C	Pracovní teplotní rozsah
U_{DSon}	V	Napětí mezi svorkami Drain-Source v sepnutém stavu
U_{GS}	V	Napětí mezi svorkami Gate-Source
v	$km \cdot h^{-1}$	Rychlost pohybu
τ	s	Časová konstanta (nabíjecí charakteristiky kondenzátoru)
π	$rad \cdot s^{-1}$	Matematická konstanta
ρ	$\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$	Měrná rezistivita mědi při 20 °C
-	$V \cdot V^{-1}$	Bezrozměrný zesilovací činitel pro INA21x (převzato z datasheetu)

Seznam zkratk a použitých výrazů

Accupack	Sériové, paralelní či obvykle smíšené propojení více článků baterie
ACIM	Střídavý induktivní motor (AC induction motor)
Antispark	Bezjiskřicí systém propojování výkonových spotřebičů
BL	Označení elektronicky komutovaného motoru (obdoba ECDC nebo ECM)
BLDC	Bezkartáčový stejnosměrný motor (BrushLess DC electric motor)
C0G	Dielektrikum MLCC kondenzátorů
CMOS	Technologie výroby čipů, hradel, mosfetů
Cu	Chemické označení mědi
CxI	Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologické inovace
DPS	Deska plošných spojů
dsPIC	Jednočipové digitální signálové procesory firmy Microchip Technology
ECDC	Označení elektronicky komutovaného motoru (obdoba BL nebo ECM)
ECM	Označení elektronicky komutovaného motoru (obdoba BL nebo ECDC)
EMI	Elektromagnetická interference (rušení)
EMS	Elektromagnetická susceptibilita (odolnost)
EOS	Elektrostatické přepětí
ESD	Krátkodobý elektrostatický výboj
FET	Unipolární tranzistory
FHSS	Metoda přenosu v rozprostřeném spektru (Freq. Hopping Spread Spectrum)
FIFO	Typ paměťového zásobníku (First In, First Out)
FireWire	Standardní sériová sběrnice označována též IEEE1394
FOC	Vektorové řízení (Field Oriented Control)
HCT	Obdoba logických obvodů HC s výstupy kompatibilními s TTL technologií
I/O	Komunikační označení sběrnice (Input / Output)
I ² C	Multi-masterová sériová sběrnice (Inter-Integrated Circuit)
IGBT	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
ISM	Pásma rádiového vysílání (Industrial, Scientific and Medical)
IP	Stupeň krytí proti vniknutí cizího tělesa či vniknutí kapalin
LCO	Pouch LCO - chemie článků: lithium-cobalt-oxide (+) / uhlík (-)
LDO	Nízko úbytkové typy stabilizátorů / regulátorů (Low-dropout regulator)

LED	Polovodičová součástka emitující světlo (Light-Emitting Diode)
Li-Ion	Lithium-Ion polymerové články (baterie)
LowESR	Vlastnost kondenzátorů týkající se velikosti vnitřního odporu
LSTTL	Obdoba logických obvodů HC / HCT
LUT	Vyhledávací tabulka, nesoucí řídicí informace (Lookup Table)
MLCC	Typ vysokokapacitních kondenzátorů
NAND	Logické hradlo s funkcí logického násobení (AND) a inverzním výstupem
One-Wire	Jednovodičová sběrnice navržena firmou Dallas Semiconductor Corp
OR	Logické hradlo s funkcí logického sčítání
OTG	USB 2.0 (On-The-Go)
PG-TDSON-8	Typ pouzdra součástky
PIC	Jednočipové mikroprocesory firmy Microchip Technology
PMSM	Motor s permanent. magnety (Permanent Magnet Synchronous Machine)
Pull-Down	Rezistory stahující napěťový potenciál k referenční zemi
Pull-Up	Rezistory zvedající napěťový potenciál k referenčnímu zdroji
PWM	Pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
QFN20	Typ pouzdra součástky (PPAK, PENTAWATT, TO-220, TQFP64)
RAM	Polovodičové paměti s přímým přístupem umožňující čtení i zápis
RISC	Architektura mikroprocesorů (Reduced Instruction Set Computing)
RS232	Komunikační sériový port nebo sériová linka
SD (Micro)	Paměťová karta s omezením 1 MB až 2 GB
SDHC	Paměťová karta s omezením 4 GB až 32 GB
SMD	Typ elektronických součástek, pájených z vrchní strany plošného spoje
SPI	Sériové periferní rozhraní (Serial Peripheral Interface)
SRM	Typ krokového motoru (Switched Reluctance Motor)
Step down	DC/DC měniče se snižujícím převodem
THT	Typ elektronických součástek, pájených ze spodní strany plošného spoje
TTL	Tranzistorová logika digitálních zařízení (Transistor-Transistor-Logic)
UART	Sériové rozhraní (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter)
VDD	Kladné napájecí napětí (obdoba VCC)
WiFi	Prostředek pro bezdrátovou komunikaci v počítačových sítích
X7R	Dielektrikum MLCC kondenzátorů

Úvod

Cílem diplomové práce je vyvinout a realizovat bezpečný funkční model pokročilého řízení pohonu elektricky asistovaného kočárku, který vznikl na ústavu CxI ve spolupráci s fakultou strojní. Vzhledem k požadavku modularity je úloha v této fázi vývoje úmyslně fyzicky strukturována na dva nezávislé bloky - duální výkonový třífázový můstek pro současné paralelní ovládání dvou BLDC motorů a centrální řídicí jednotku s rozšiřujícími periferiemi. Aktuální verze kočárku implementuje v zadních 10“ kolech dvojici senzorových BLDC elektromotorů s planetovou převodovkou.

Úvodní texty popisují princip fungování bezkartáčových stejnosměrných motorů, jejich vnitřní topologii, zapojení. Na ni navazuje kapitola týkající se teorie řízení. Zde jsou podrobněji vysvětleny metody lichoběžníkové (šestikrokové) a sinusové komutace, včetně pokročilého vektorového řízení. Důležité jsou i módy spínání (unipolární / bipolární / nezávislé / komplementární), které názorněji přibližuje princip H-můstku. Teorie dále představuje, pro budoucí aplikaci asistovaného pohonu vozíku, velmi klíčové napájecí akumulátory, jejich vlastnosti, kapacity, hodnoty dostupných napětí a srovnává technologické výhody či nevýhody.

Praktická část se nejprve věnuje návrhu výkonného třífázového můstku, který má být v konečném důsledku předstupněm třífázového měniče. Desku plošných spojů lze strukturovat na napájecí část (kaskádní dimenzování stabilizátorů), obvod bezjiskřicího připojování, výkonové jádro, problematiku spínání mosfetů pomocí budičů s virtuální plovoucí zemí, ochranné obvody...

Následná navazující část podrobněji představuje kompletní vývoj a význam jednotlivých partií řídicí jednotky - jádro dvouprocesorové logiky, umožňující snadnější dekodování Grayova kódu Hallových senzorů v reálném čase, I²C komunikaci s tříosým akcelerometrem monitorujícím aktuální terén, servisní USB komunikaci, záznam provozních údajů na Micro SD kartu, plnohodnotné bezdrátové připojení skrze integrovaný bluetooth modul, ochranné prvky ve smyslu součtů logických přerušení... Pro kompletnost úlohy je závěr práce stručněji věnován vlastnímu řešení řídicího softwaru implementovaného v obou mikroprocesorech PIC.

Vstupní technické parametry

Význam aplikace pokročilého řízení pohonu elektricky asistovaného kočárku spočívá v mechanické asistenci při jeho tlačení. Na základě tříosého akcelerometru je snímán náklon povrchu a v interakci s uživatelskými pokyny získávanými skrze senzory v rukojeti generuje řídicí jednotka odpovídající pomocné momenty kol ve směru jízdy tak, aby nedocházelo k samovolnému pohybu.

Tab. 0.1 - Technické parametry BLDC motoru HL10G motor

Napájecí napětí	24 V
Průměrný / špičkový příkon	180 W / 250 W
Rychlost	488 ~ 366 otáček • min ⁻¹
Účinnost	≥80 %
Průměr kola	25,4 cm
Hmotnost	≤4 Kg
Normalizované krytí IP	IP54
Hlučnost	<54 dB

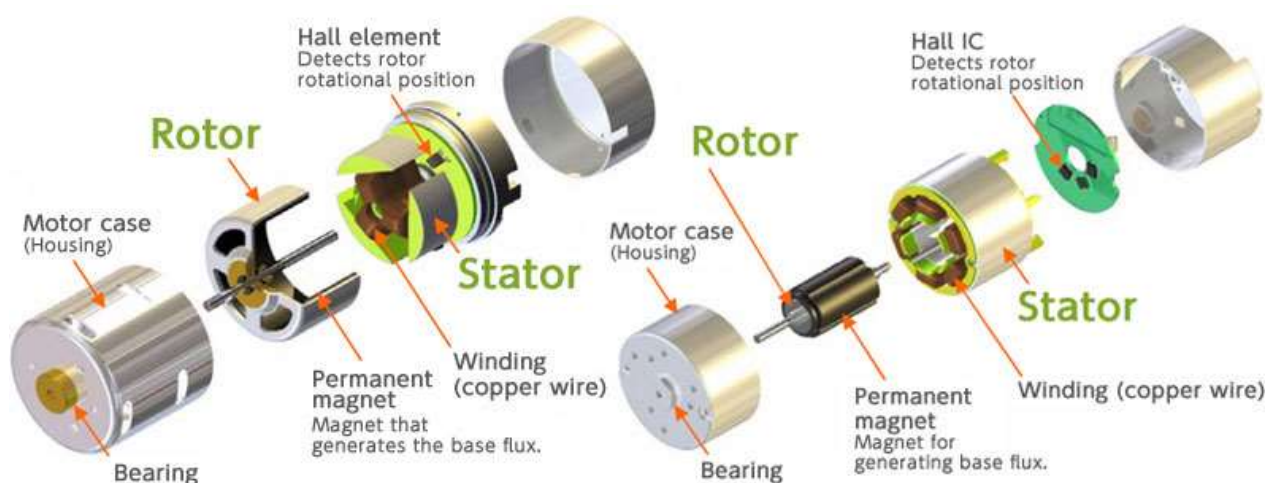


Obrázek 0.1 - Mechanická konstrukce kočárku // Autor: Bc. Martin Dvořák, FS TUL, 2014

1. Bezkomutátorové stejnosměrné motory

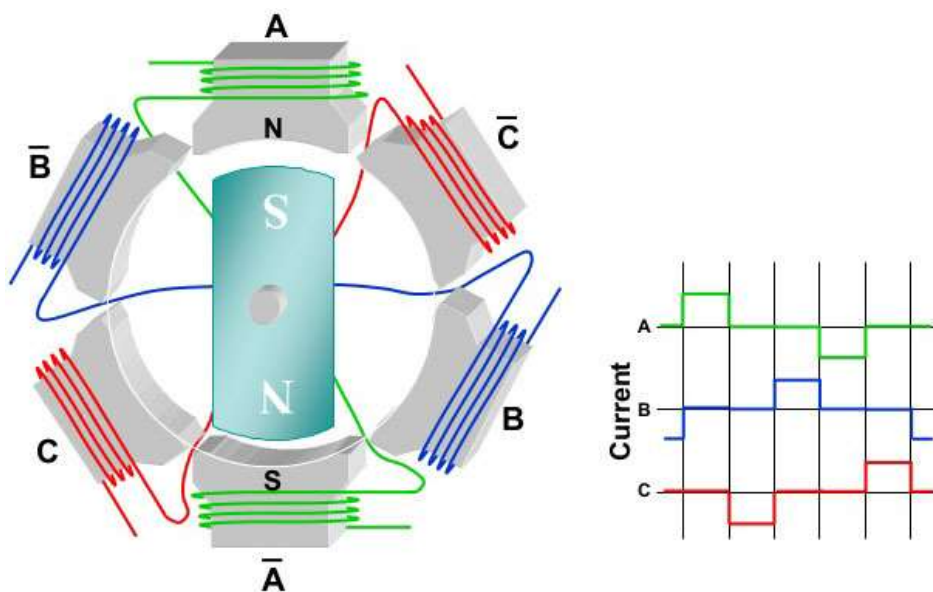
BLDC motor je technické označení vycházející z termínu brushless DC Motor a je využíváno pro speciální stejnosměrné motory s elektronickou komutací. Tyto motory lze v literatuře nalézt i pod méně známými pojmy BL motor nebo ECM motor (Electronically Commutated Motor). Jejich uvedení na trh a vývoj postupuje výrazně rychleji, než dokáží odborné učebnice sledovat, proto není ani terminologie v konečném důsledku sjednocena.

Stejnosemnné pohony byly v minulosti výhradně zastoupeny komutátorovými elektromotory s permanentními magnety nebo se sériovým či derivačním propojením statorového a rotorového vinutí. Princip komutátorového přenosu elektrické energie byl postupným zdokonalováním přiveden k vysokým užitným hodnotám a nyní je v odborné literatuře označován, při precizním provedení, za velmi spolehlivý proces. Tato informace ovšem platí pouze za jistých podmínek, splnitelných především pro výkonově silnější motory. Pro menší zařízení se kluzné spojení sběrných uhlíků s napájecími lamelami stále jeví, z časově dlouhodobějšího hlediska, na údržbu jako velmi problémové. Požadavek vybraných aplikací na trvalý bezúdržbový provoz je tedy pro komutátorové stroje v podstatě nesplnitelný.



Obrázek 1.1 - Vnitřní struktura BLDC motorů // Zdroj: <http://www.dynetics.eu>

U současných BLDC motorů je mechanická komutace nahrazena elektronickou, která s kluzným přenosem elektrické energie nemá prakticky nic společného. Fyzické uspořádání rotujících a pevných částí je u BLDC motorů, vzhledem ke komutátorovým motorům, zcela obrácené. Architektura tedy spočívá v pevném uložení vinutí a rotujícím budiči, obvykle z permanentních neodymových magnetů. Díky tomu ovšem ale tyto stroje vyžadují sofistikovanější řídicí jednotku, která je schopna zajistit elektronickou komutaci, tedy definované přepínání cívek, případně orientaci smyslu proudu. Informace, získávané senzorickým snímáním vzájemné polohy rotující a statické části jsou vyhodnocovány v mikroprocesoru, kde se následně v interakci s uživatelskými požadavky generují data pro spínání výkonových FET tranzistorů. Malé stroje pro indikaci úhlového natočení hřídele zpravidla využívají digitálních Hallových senzorů, neboť enkodéry či rezolvery by značně zvyšovaly celkové náklady pohonu. Integrované elektronické jednotky dnes již běžně implementují ochranné prvky týkající se přímého monitoringu generovaného tepla vinutím, proudové přetížení, přepólování...



Obrázek 1.2 - Třífázové zapojení statorových cívek // Zdroj: <http://cz.mouser.com>

BLDC motory jsou s jistými výhodami využitelné v aplikacích, kde se nachází stejnosměrné napájení. Jako zástupce lze uvést akumulátorové nářadí, manipulační a pohonné agregáty, přepravní / zvedací průmyslové vozíky, dopravní prostředky všeho druhu, ale samozřejmě také v modelářství a dalších odvětvích. Spousta aplikací, s nově přichozími motory a trvale klesající cenou řídicí elektroniky teprve na své využití čeká [1].

2. Napájecí akumulátory

Napájecí akumulátory jsou nedílnou součástí všech mobilních aplikací. Následující text se pokusí stručně přiblížit dostupné typy nejrozšířenější kategorie, bez kterých by budoucí projekt asistovaného pohonu vozíku neměl šanci vzniknout. Cílem ovšem nebude výběr konkrétního typu, ale obecné představení základních parametrů, kapacity, dostupných napěťových hladin a princip slučování jednotlivých článků v rámci tzv. accupacků. Projekt asistovaného pohonu vozíku předpokládá využití BLDC motoru s označením HL10G, případně jiného obdobného modelu s nominálním napájecím napětím pohybujícím se okolo 24 V a maximálním dosahovaném příkonu v rozmezí 180 W až 250 W

2.1. Lithium-Ion polymerové články

Lithium-Ion polymerové články představují v současné době jeden z nejmodernějších zdrojů akumulované energie. Vyznačují se především velmi příznivým poměrem hmotnosti na energetickou hustotu. Jmenovité napětí článku odpovídá rozptylu 3,2 V až 3,8 V. Při experimentování s tímto typem baterie je ale nutné dávat si zvýšený pozor na dva hlavní faktory - napěťová bilance a teplota. Přebíjení článku přes hranici 4,2 V či naopak vybití pod 2,75 V, pro chemické složení lithium-cobalt-oxide kladné elektrody a uhlíkové záporné, znamená obvykle nevratné destruktivní poškození. Hodnotu kritického napětí zpravidla nelze měřit pouze na výstupních svorkách akumulátoru v celkovém součtu, ale musí se korigovat pomocí balančního konektoru. Tento konektor zprostředkovává individuální přístup ke všem dílčím článkům [2].

Za účelem zvýšení napájecího napětí a obvykle i kapacity se jednotlivé články seskupují do accupacků. Accupack představuje sériové, paralelní, či smíšené propojení článků v rámci jednoho obalu baterie. Při sériovém zapojení se sčítá jejich napětí, při paralelním zapojení se sčítají naopak kapacity. S tím jsou poté spojena i pravidla značení: (pro názornost je propojování prezentováno na základních člancích)

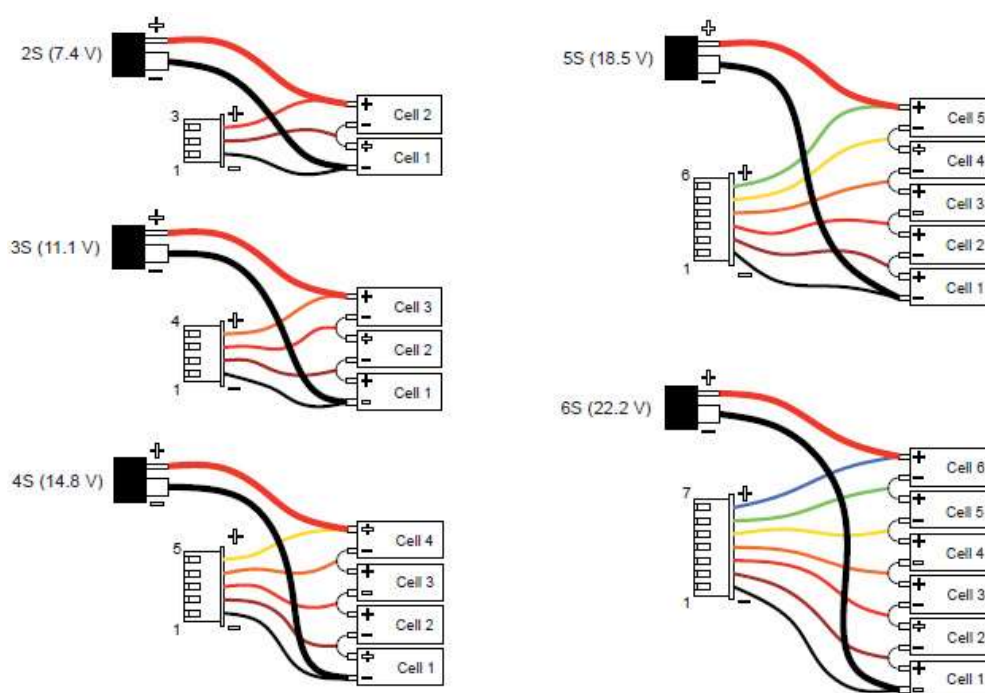
2s 5000 mAh - 2s označuje zapojení dvou článků do série. V accupacku jsou dvě baterie o stejné kapacitě 5000 mAh, přičemž se sčítá jejich napětí. Celkové napětí accupacku proto odpovídá 7,4 V ($2 \cdot 3,7$ V). V maximálních hodnotách pak 8,4 V ($2 \cdot 4,2$ V).

2s1p 5000 mAh - tento zápis, přestože je po stránce zapojení správný, se zpravidla nevyužívá. V praxi znamená, že accupack zahrnuje pouze dvě sériově zapojené baterie. Jedná se o ekvivalent k variantě 2s 5000 mAh a proto se údaj 1p moc neuvádí a zkracuje se jenom na 2s.

2s2p 5000 mAh - zde je situace trochu složitější. V accupacku jsou zapojeny celkem čtyři články - dvě sériové kombinace baterií po dvou, které jsou paralelně propojeny. Každý z jednotlivých článků má skutečnou kapacitu 2500 mAh a napětí 3,7 V. Vše se na výstupních svorkách násobí dvakrát, což vytváří baterii s nominálním napětím $2 \cdot 3,7 = 7,4$ V a kapacitou $2 \cdot 2500 = 5000$ mAh [3].

Tab. 2.1 - Důležitá napětí pouch LCO článků

Maximální napětí článku	4,20 V
Nominální napětí článku	3,70 V
Minimální napětí článku	2,75 V



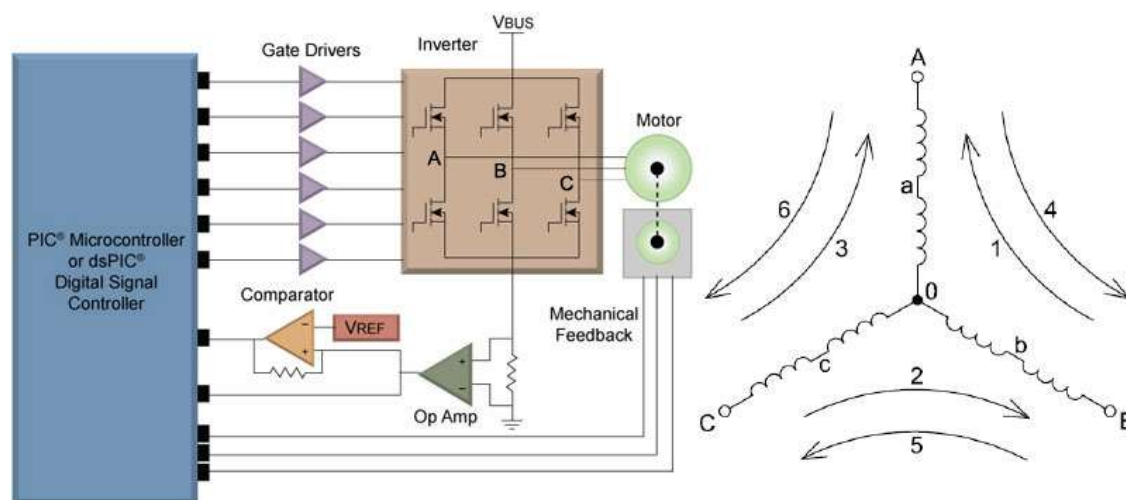
Obrázek 2.1 – Vnitřní struktura propojování článků Li-Ion accupacků

3. Teorie řízení

Na rozdíl od stejnosměrných motorů, kde jsou rotorové cívky přepínány mechanicky, vyžadují bezkartáčové motory ke svému provozu elektronické komutační obvody. Pro jejich řízení jsou v praxi nejrozšířenější tři základní metody: sinusová, šestikroková a pro pokročilé aplikace metoda vektorového řízení. Jednotlivé řídicí algoritmy mohou být implementovány zcela odlišným způsobem závislejícím na možnostech snímání rotorové polohy, systémového hardwaru, provozních požadavcích.

3.1. Šestikroková komutace

Jednotlivá statorová vinutí BLDC motoru jsou na obou stranách připojena k třífázovému můstku, sestaveného ze šesti spínacích prvků (IGBT / FET tranzistorů). Postupným spínáním tranzistorových dvojic jsou komutovány proudy cívek a tím vzniká točivé magnetické pole. V každém okamžiku šestikrokového řízení se ve třífázovém zapojení do hvězdy (vzájemně posunuto o 120°) aktivují podle polarit a natočení hřídele dvě fáze motoru. Třetí fáze je vždy plovoucí, tedy odpojena a může být ve speciálních případech využita pro bezsenzorové snímání polohy („sensorless control“ což není předmětem této práce). Změnou sekvence řízení lze reverzovat smysl chodu motoru. Lichoběžníková (šestikroková) metoda je velmi oblíbená pro svou jednoduchost implementace.



Obrázek 3.1 - Ucelený koncept třífázového měniče, ovládání fází // Zdroj: <http://www.microchip.com>

Každý sektor (60°) elektronické senzorové komutace je zmapován unikátní kombinací výstupů Hallových senzorů (H1 až H3), které odpovídají přesnému natočení hřídele. Z informace rotorové polohy se pak již analogicky podle tabulky vyčítají ovládací signály pro spínací prvky jednotlivých vinutí. Šipky signalizují aktivní fáze daného sektoru natočení a zároveň definují sepnuté tranzistory. ↓ - spodní, ↑ - vrchní

Tab. 3.1 - LUT tabulka šestikrokové komutace

Krok	H1	H2	H3	Binární kód	Fáze A	Fáze B	Fáze C
1	1	0	1	(0101) 5	-	↓	↑
2	1	0	0	(0001) 1	↑	↓	-
3	1	1	0	(0011) 3	↑	-	↓
4	0	1	0	(0010) 2	-	↑	↓
5	0	1	1	(0110) 6	↓	↑	-
6	0	0	1	(0100) 4	↓	-	↑

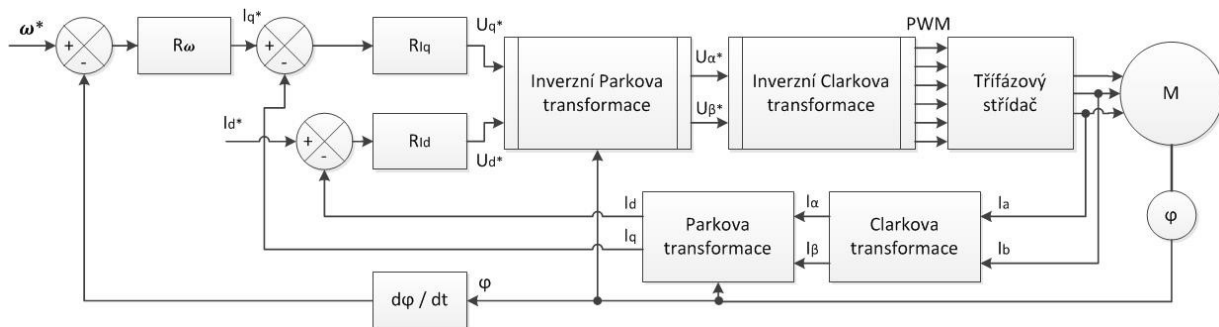
Metoda šestikrokové komutace se s výhodami nejčastěji využívá v aplikacích vyžadujících nenáročné zpětnovazebné řízení. Podstata geometricky lichoběžníkového spínání, vždy pouze dvou vinutí, sebou přináší značné nevýhody v oblasti zvlnění mechanického momentu, zejména pak především při nízkých otáčkách. Tyto generované nelinearity se mohou projevovat vibracemi a hlučným provozem.

3.2. Sinusová komutace

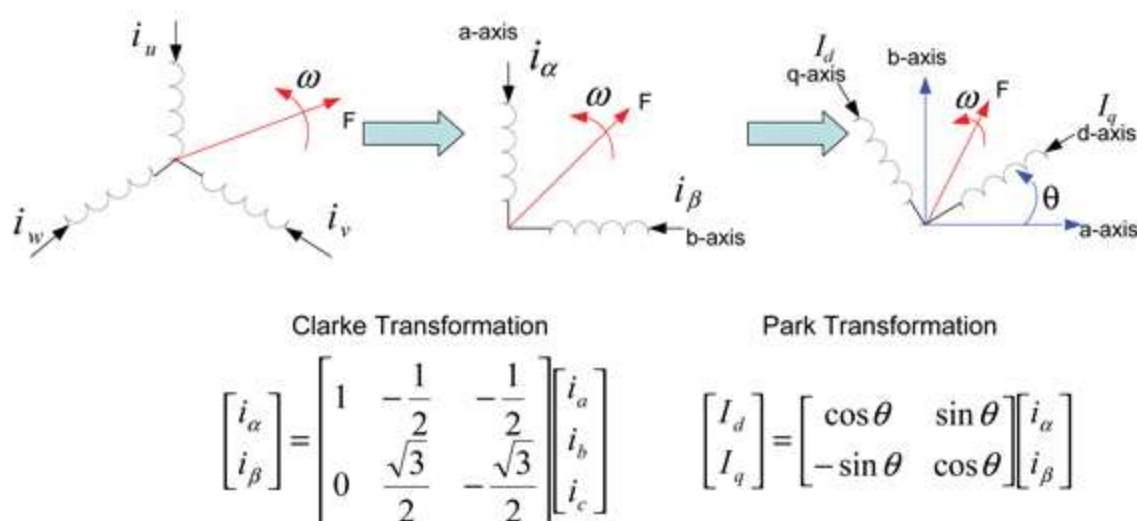
Způsob řízení motoru prostřednictvím sinusové komutace se označuje za středně pokročilý a je doporučován zejména pro motory se sinusovým průběhem indukovaného napětí, známých jako PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor). Kritické stavy, téměř digitálních spínacích špiček lichoběžníkové rampy, nahrazuje napěťový sinusový průběh. Aby komutace opět neprobíhala skokově, je nutné přistupovat k elektronice mnohem komplexněji a zajistit odpovídající napájení současně všech tří vinutí. Návrh jednotky se zakládá na sofistikovanějším snímání polohy natočení hřídele. Nyní již nestačí pouhých šest informací na otáčku a proto se pomocí optických enkodérů, indukčních rezolvrů nebo i bezsenzorového snímání spojitěji mapuje celý průběh. Navržený pohon se sinusovou metodou ovládání značně potlačuje zvlnění momentu a tím je schopen dosahovat velmi plynulého chodu s vysokou přesností regulace.

3.3. Vektorové řízení

Vektorové řízení FOC (Field Oriented Control) představuje v současné době nejpokročilejší metodu řízení, která pracuje s velmi složitými kaskádními regulátory. Kromě precizního snímání rotorové polohy, dříve zmíněnými senzory, se dále v mikroprocesorech vyhodnocují zpětnovazební informace proudových a napěťových vektorů a na základě toho generují aktuální statorové proudy. Ty jsou modulovány prostorovým vektorem, zastupujícím dvě oddělené hodnoty. Převody tří statorových proudů na jednotlivé složky se algoritmicky zpracovávají Clarkovou, Parkovou transformací a jejich inverzními procesy. Clarkova transformace modifikuje třífázový sinusový systém na dvoufázový časově proměnný, značeno řeckými písmeny α , β . Parkova transformace převádí výstup Clarkovy transformace, tedy stacionární souřadný systém do dvoudimenzionálního časově nezávislého souřadného systému d, q. Systém d, q (d - direkt, q - quadrature) je pevně svázán hodnotou úhlu natočení hřídele a tedy zároveň i s budícím magnetickým tokem rotoru (d). Statorový tok je indukován proudem v ose q kolmé na osu d. Kvadrurní složka q je označována za momentu-tvornou a přímá složka d naopak za toko-tvornou. Transformační algoritmy fungují podle zakresleného regulátoru (obrázek 3.2) i v inverzním provedení. Třífázová PWM střída je generována na základě napětí získávaných inverzní Clarkovou transformací [4].



Obrázek 3.2 - Blokový regulátor vektorového řízení



Obrázek 3.3 - Clarkova a Parkova transformační matice, význam vektorů // Zdroj:

<http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2011/oct/3phase-motor-control-renesas-floating-point-rx-mcu-series-advantage-over-fixed-point>

Vektorová komutace obecně nabízí nejefektivnější možnosti řízení pro široké využití v náročných procesech. Její složitost je vykoupena podstatně složitějším hardwarovým vybavením a také odpovídající ceně.

Tab. 3.2 - Srovnání metod elektronických komutací

Komutační metoda	Řízení otáček	Řízení momentu		Složitost implementace
		Nízké ot.	Vysoké ot.	
Lichoběžníková	výborné	zvlnění	efektivní	nízká
Sinusová	výborné	výborné	neefektivní	střední
Vektorové řízení	výborné	výborné	výborné	vysoká

3.4. Módy spínání

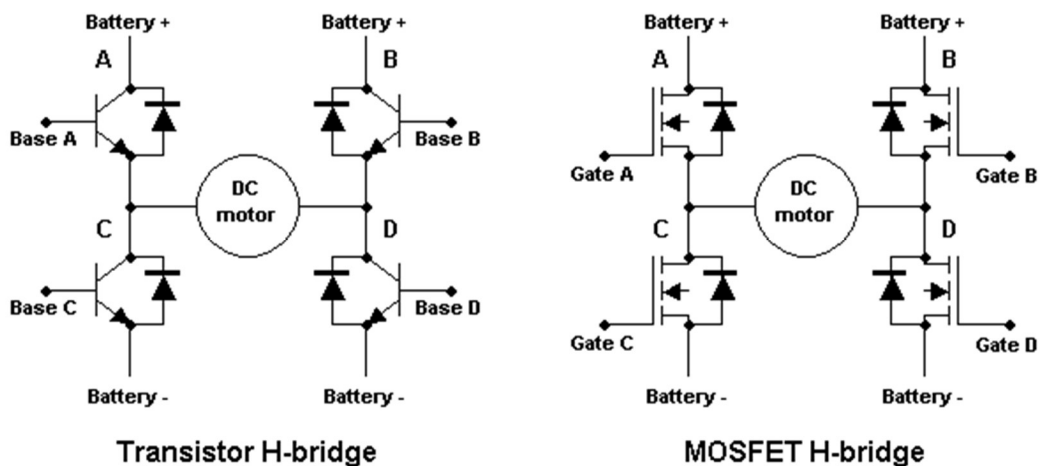
Pojmy bipolárního a unipolárního spínání se spojují s napětím, jaká jsou měřitelná na svorkách motoru. Pro jednoduchost lze uvažovat stejnosměrný, cize buzený motor (s permanentními magnety) a jedním statorovým vinutím. Pro řízení takto zjednodušeného motoru lze využít čtyřtranzistorové topologie střídače, kdy spínací prvky tvoří dvě totožné komplementární větve. Jednotlivé spínací prvky H-můstku jsou vzájemně nezávisle ovladatelné [5].

Bipolární spínání je založeno na křížovém spínání tranzistorů A-on, D-on (B, C off), kdy je na svorky motoru přivedeno kladné napájecí napětí U_{DD} a reverzovaném stavu B-on, C-on (A, D off), což zajistí obrácený smysl proudu.

Unipolární spínání nejprve aktivuje prvky A-on, D-on (B, C off), kdy je opět motor napájen ze zdroje a poté dojde ke zkratování indukovaných proudů C-on, D-on (A, B off).

Nezávislé spínání vychází z předpokladu jednoho trvale sepnutého tranzistoru a druhého pulzně šířkově modulovaného tak, aby bylo dosaženo na svorkách žádané střední hodnoty.

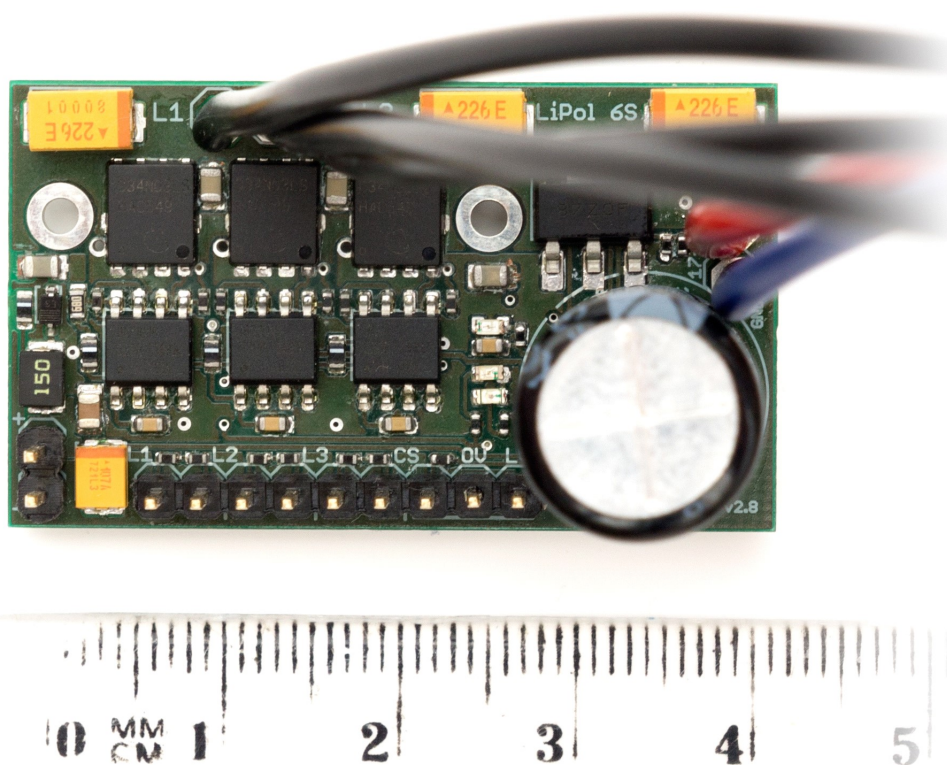
Komplementární metoda spínání ovládá oba tranzistory jedné větve invertoru tzv. komplementárním způsobem, to znamená, že se při vedení proudu spínací prvky vzájemně střídají. Přechodové jevy nastávající při spínání / vypínání, kdy teoreticky mohou zkratově vést oba tranzistory, se ošetřují na softwarové úrovni krátkodobým vypnutím obou (A-off, C-off). Tato doba je označována anglickým pojmem „deadtime“.



Obrázek 3.4 - H-můstek, topologie dvoufázového střídače // Zdroj: <http://www.rctankcombat.com>

4. Návrh třífázového můstku

Návrh třífázového můstku pro řízení BLDC motorů musí uvažovat mnoho faktorů. Hned od počátku by mělo být zřejmé, pro jakou konkrétní aplikaci se plánuje jeho využití. Základními kritérii jsou parametry napájení (akumulátory, stejnosměrný zdroj, síť), typ a charakteristiky motoru (podrobnější požadavky / metoda řízení), specifické rozměry, upevnění, možnosti chlazení a celkové provozní podmínky (normované krytí IP), ochranné obvody...

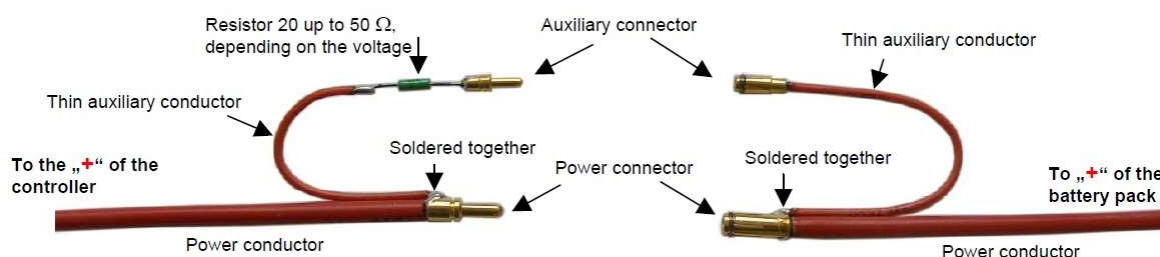


Obrázek 4.1 - Výsledná funkční verze třífázových můstku

4.1. Bezjiskřicí připojování

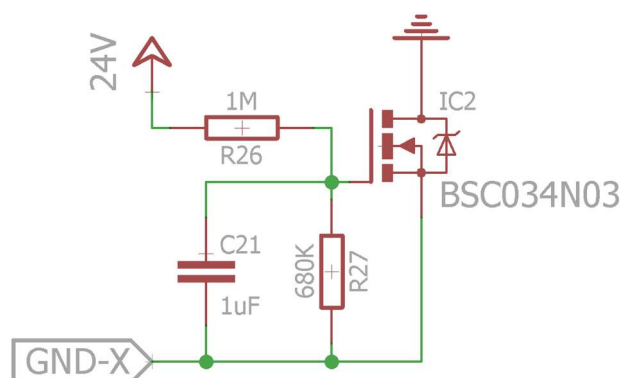
Připojováním nízkoimpedančních kondenzátorů (LowESR) na napájecí napětí vyšší než 20 V dochází již k efektivnímu jiskření. Tomuto jevu je snaha předcházet, zejména díky nadměrnému opotřebovávání ploch spínacích kontaktů, které mohou později vykazovat zvýšené přechodové odpory a tím i potenciální bezpečnostní riziko. Bezjiskřicí propojování anglicky známé pod „Antispark circuit“ je možno zajistit několika způsoby. Prvním z nich může být využití speciálního dvojitého konektoru, kde

se slabým vodičem nejprve sepne obvod přes antispark rezistor (Auxiliary connector) a po rázovém nabytí všech kapacit se propojí silový konektor (Power connector) [6]. Uvedený mechanismus má ovšem význam pouze v klidovém stavu aplikace, kdy průměrný spotřebovávaný výkon nepřevyšuje distribuční možnosti „antispark rezistoru“. V internetové síti hobbyking.com existují i profesionálně dimenzovaná průmyslová řešení zmíněného konektoru, například pod technickým označením XT90-S Antispark. Navenek se jedná o typické dvoubodové propojení, vycházející z populárního konektoru XT90 (je s ním samozřejmě i zpětně kompatibilní), které ovšem v sobě implementuje plnohodnotné prvky popsané bezjiskřicí ochrany.



Obrázek 4.2 - Bezjiskřicí propojení // Zdroj: <http://www.avdweb.nl/solar-bike>

Elektronickou alternativou, kdy není možné využití popsaného konektoru (například v situaci jednoduchého dvoupolohového přepínače) se nabízí schéma automatického samospouštěcího obvodu. Jeho funkce spočívá v plynulém exponenciálním náběhu napájecího napětí, zajištěného postupným otevíráním výkonového FETu. Přechodové spouštěcí pásmo definuje proud odporového děliče a zvolené kapacity kondenzátoru. Jeho tvar je součtem nabíjecí logaritmické charakteristiky s časovou konstantou τ a otevírací charakteristiky konkrétního spínacího prvku, tedy mosfetu BSC034N03.



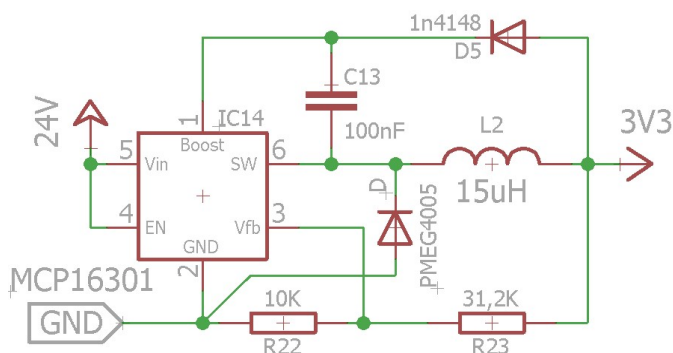
Obrázek 4.3 - Elektronický antispark circuit s exponenciálním náběhem

4.2. Napájecí část, kombinace stabilizátorů

Pro budoucí aplikaci asistovaného pohonu vozíku (kočárku) byl vybrán motor HL10G od výrobce UUmotor (případně obdobný) s nominálním příkonem 180 W (rychlost: $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ až $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, otáčky: $488 \sim 366 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$). Katalogové listy dále uvádějí definované napájecí napětí 24 V, čemuž odpovídá při zachování výkonu proud 7,5 A. Napájecí lithium-Ion polymerové články, podle výše specifikovaných údajů, dodávají v bezpečném rozsahu napětí od 2,9 V do 4,2 V. Pro accupack s označením 6s je pak tento rozsah mezi 17,4 až 25,2 V a od toho se bude odvíjet i návrh stabilizátorů.

Lineární integrované stabilizátory jsou velmi rozšířeným prvkem mnoha obvodů. Jejich obliba spočívá ve velmi nízkých pořizovacích nákladech (řádově jednotky korun), malých rozměrech (dostupné v rámci jediného SMD pouzdra) a jednoduchosti zapojení (vyžadují minimum externích součástek). S dostatečnou účinností vynikají zejména v aplikacích, kde nedochází k výrazné redukci vstupních parametrů. Ztrátový výkon lineárního stabilizátoru odpovídá rozdílu napětí na vstupní a výstupní svorce a součinu protékajícího proudu. Tento výkon, ve formě tepelné energie, je nutné odpovídajícím způsobem odvádět.

Spínané stabilizátory se prosazují svoji nespornou výhodou vysoké účinnosti, která dosahuje prakticky stejných hodnot pro různé a obvykle i velmi široké poměry vstupního a výstupního napětí. Při redukci vstupního napětí z 25,2 V na výstupních 3,3 V jsou schopny pracovat s účinností 80 až 95 %, zatímco lineární stabilizátory pouze se 40 %. Pro mnohé aplikace je nejvhodnějším řešením hotový DC/DC měnič, který zahrnuje vše potřebné v jednom pouzdře. Spínané stabilizátory lze také vytvořit efektivněji na míru z diskretních součástek pomocí spínaných regulátorů typu „step down“ [7].



Obrázek 4.4 - Schéma spínaného stabilizátoru s regulátorem MCP16301

Schématické zapojení třífázového můstku uvažuje ve svém základním návrhu kombinaci obou zmíněných typů stabilizátorů. Elektroniku lze z pohledu napájení podrobněji separovat na 3,3 V logiku řídicích obvodů a na 12 V budící část vstupních gejtů mosfetů. Proudová náročnost doprovodné řídicí elektroniky vychází ze součtů dílčích napájených prvků, tedy proudového čidla INA214, osmice hradel AND zapouzdrěných v součástce 74VHC541, operačních zesilovačů MCP6001 a sadě signalizačních LED diod.

Tab. 4.1 - Proudové náročnosti elektroniky třífázových můstků

Součástka	Počet	Proud [uA]	Celkový proud [mA]
INA214	1	65	$65 \cdot 10^{-3}$
74VHC541	1	80	$80 \cdot 10^{-3}$
MCP6001	2	100	$200 \cdot 10^{-3}$
LED	3	5000	15
Pull R	-	-	0,1
Celková maximální spotřeba elektroniky:			~ 15,5 mA (52 mW)

Podle tabulky 4.1 jsou spotřeby všech aplikovaných logických prvků (<500 uA) významně skryty pod spotřebou LED diod. Ve výchozím stavu svítí pouze zelená kontrolka signalizující přítomnost napájecího napětí, lze tedy zaokrouhleně uvažovat permanentní spotřebu okolo 5 mA a celkový odebíraný výkon 18,4 mW. V nouzových stavech - při přetížení jednotlivých BLDC motorů anebo při vybití lithium polymerové baterie pod mez 2,9 V na článek se k celkové spotřebě přičítají podle situace další dvě kontrolní LED. V souhrnu může řídicí elektronika třífázového můstku odebírat z akumulátorů špičkově až 52 mW včetně 8 % úbytků na DC/DC měniči. Měnič v tomto bodě zapojení figuruje kromě napájení elektroniky i jako stabilní zdroj referenčního napájení pro externí aplikace s trvalým výkonem (podle zvolené cívky) do 130 mA. Buzení spínacích bran mosfetů prostřednictvím IR2101 je naopak díky své proudově nenáročné odezvě zajišťováno lineárním stabilizátorem MCP1804. Napěťový spád při požadovaných výstupních parametrech 12 V odpovídá podle kondice akumulátoru v rozmezí od 5,4 V do 13,2 V. Přestože by se díky statickému proudu I_{GS} (Gate-Source) 10 nA (pro $U_{GS} = 20$ V), tedy vstupním odporům řádově v M Ω , mohlo nesprávně uvažovat o zanedbatelných proudech, je nutné také kalkulovat s kapacitami vnitřních tranzistorových přechodů a pracovní frekvencí. Pro výkonové spínací mosfety BSC034N uvádějí katalogové listy (za splnění definovaných podmínek) vstupní kapacitní vazbu

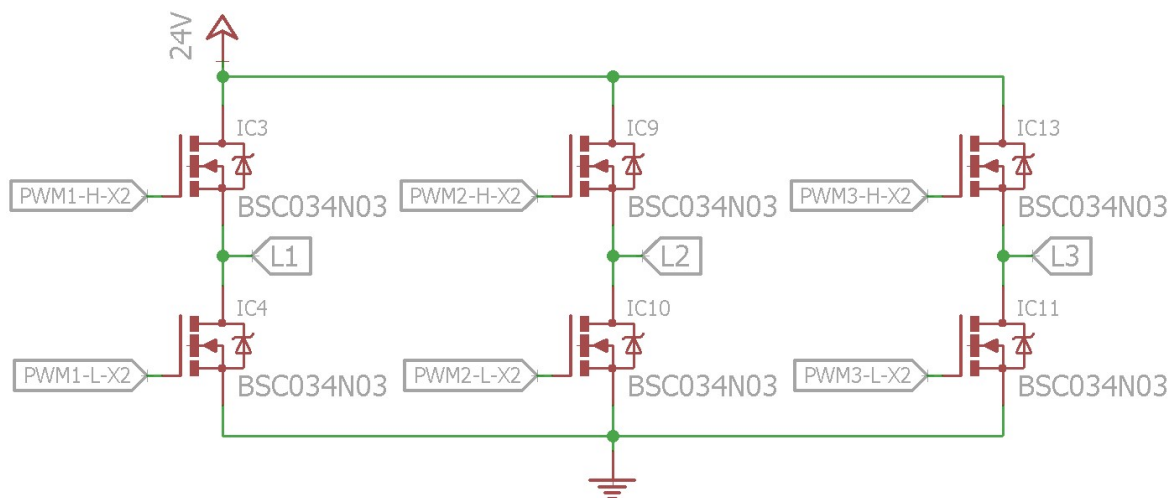
$C_{iss} = 4300 \text{ pF}$, která vyvolává pro modulační PWM frekvenci 5000 Hz podle vztahu (1) proud $I_{GS} = 1,6 \text{ mA}$ na jeden spínací prvek. V komplementárním módu řízení posléze vychází tepelná výkonová ztráta na lineárním stabilizátoru MCP1804 v závislosti na napětí od 17,5 mW do 42,8 mW (2).

$$I_G = \frac{U_{GS}}{X_{CGS}} = 2 \cdot U_{GS} \cdot \pi \cdot f_{PWM} \cdot C_{iss} = 24 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \cdot 4,3 \cdot 10^{-9} \cong 1,62 \text{ mA} \quad (1)$$

$$P_{max} = U_{I-O} \cdot 2 \cdot I_G = 13,2 \cdot 2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-3} \cong 42,8 \text{ mW} \quad (2)$$

4.3. Výkonové spínací prvky

Nejdůležitější částí celého návrhu třífázového můstku pro ovládání BLDC motorů je správně dimenzované jádro spínacích prvků. Můstek lze sestavit z IGBT tranzistorů, které se vyznačují svou vnitřní kaskádní strukturou s velkým zesílením nebo z unipolárních tranzistorů (FET). Komerčně vyráběné měniče mívají zpravidla implementovány mosfety s indukovaným kanálem a proto se jimi bude zabývat i následující návrh. Schéma zapojení vychází z H-můstku zmíněného v teoretické části.



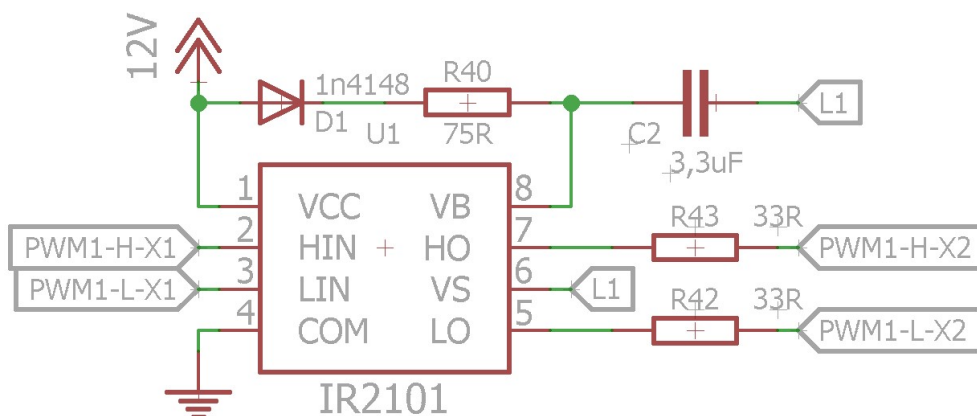
Obrázek 4.5 - Schéma třífázového můstku s N kanálovými mosfety

Napájecí napětí LCO Li-Ion článků (lithium-cobalt-oxide s uhlíkovou anodou) kolísá v rozmezí 17,4 až 25,2 V (mínus ztráty na konektorech při maximálním zatížení, antispark obvodu, vedení, zvlnění), což výběr mosfetů do jisté míry omezuje. Při řízení

proudově silových obvodů je velmi nutné, aby se otevíraly strmě zcela nadoraz a tím se minimalizoval jejich vnitřní odpor $R_{DS(on)}$. Parametricky nejlépe vycházejí BSC034N. Tyto unipolární tranzistory s indukovaným N kanálem snesou (při $U_{GS} = 12\text{ V}$) trvalý spínací proud $I_D = 100\text{ A}$, což je oproti požadovaným 10 A značně naddimenzováno. Maximální pulzní proud je pak limitován, při dokonalém chlazení, na $I_{DM} = 400\text{ A}$. Svorkové napětí U_{DS} (Drain-Source Voltage) výrobce uvádí 30 V . Pracovní rozsah polovodičových prvků se pohybuje v rozmezí $T_j = -55\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $175\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vnější pouzdro PG-TDSON-8 s technologií OptiMOS™ 3 a vnitřním tepelným odporem $2\text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$ zvládá přenášet do rozlité mědi podkladové DPS ztrátový výkon P_{tot} až 57 W [8].

4.4. Buzení mosfetů, virtuální plovoucí zem

Využití mosfetů s indukovaným kanálem N sebou přináší jisté komplikace v oblasti jejich můstkového komplementárního spínání. Pokud bychom chtěli pootočit BLDC motor sepnutím křížové kombinace horního tranzistoru Q1 a dolního Q4, nestačí pouze triviálním způsobem připojit na jejich řídicí vývody modulovaných 12 V . Spínací prvky se vodivě otevírají s dosažením určité hladiny napětí U_{GS} mezi elektrodami Gate–Source. Vybudit tranzistor Q4, který má elektrodu Source na zemi (Low side) nebývá problém. Opakem je tomu už ale u vrchního (High side) tranzistoru Q1, neboť napětí U_{GS-Q1} snižuje úbytek na sériovém zapojení dvou statorových cívek a pro důslednost také téměř zanedbatelné ztrátové napětí na aktivním PN přechodu $U_{DSon-Q4}$. Odborné technické dokumentace uvádějí pro čistě induktivní charakterity zátěží (cívky BLDC motorů) dosahované špičkové hodnoty napětí řádově ve stovkách voltů. Vybudit tranzistor s takto vysokým potenciálem není jednoduché a navíc nemusí být ani bezpečné.



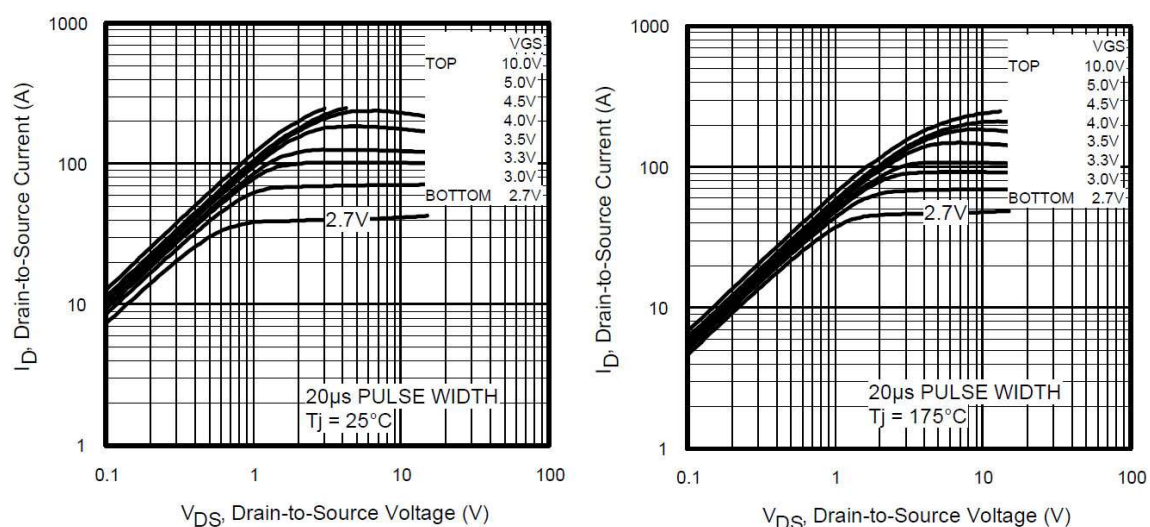
Obrázek 4.6 - Schéma budiče mosfetů s IR2101 (virtuální plovoucí zem)

Tato problematika lze řešit celkem elegantně využitím virtuální plovoucí země, tedy například specializovanými „high and low side“ budiči IR2101 nebo transformátory. Pojem virtuální plovoucí zem (anglicky Floating channel) je možno názorněji chápat jako uměle vytvořené napětí vztahované k dané elektrodě Source nikoli již k zemi. Vnitřní princip zvyšování hodnot potenciálu IR2101 tkví v nábojových pumpách. Logické vstupy jsou plně kompatibilní s 3,3 V CMOS nebo LSTTL výstupy.

Souhrnné vlastnosti IR2101

- Oproti transformátorům velmi rozměrově úsporné, laciné
- Vyžaduje absolutní minimum externích součástek
- Neposkytuje galvanické oddělení budících signálů
- Přímou konstrukčně uzpůsobeno pro buzení mosfetů nebo IGBT tranzistorů

Uvedené schéma zajišťuje ovládání spínacích prvků jejich maximálním povoleným napětím $U_{GS\ max}$ a tím snižuje dobu přechodových jevů, které při vysokofrekvenčním pulzně šířkovém ovládání značně generují disipativní tepelné ztráty. Nároky na strmost charakteristiky vyvolávají v návaznosti na kapitulu zabývající se stabilizátory odpovídající řídicí proud I_G . Z obrázku 4.7 dále jednoznačně vyplývá rozdílná proudová průchodnost I_D při neúplném otevření, tedy $U_{GS} < 5\ V$.

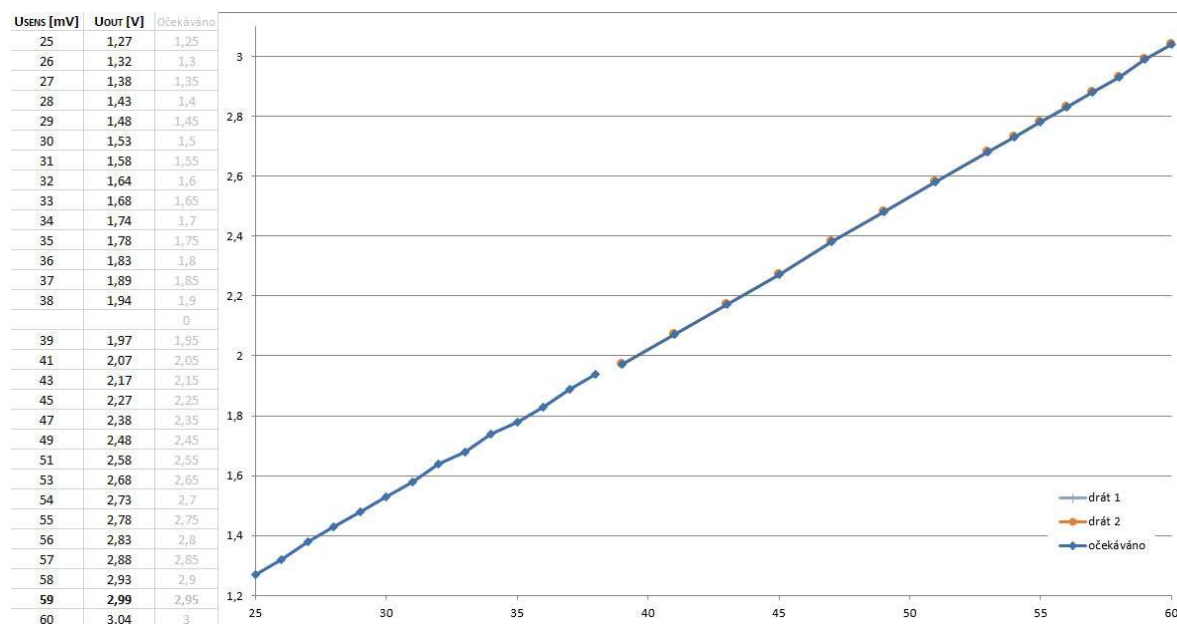


Obrázek 4.7 - Závislost maximálního proudu I_D na napětí U_{GS} a U_{DS} // Zdroj: <http://www.irf.com>

4.5. Ochranné a doprovodné řídicí prvky

Ochrannými a doprovodnými řídicími prvky se rozumějí obvody, které nejsou nezbytně nutné pro návrh třífázového měniče, ale jistým způsobem aplikaci obohacují. Patří mezi ně obvody podpěťové ochrany lithium-Ion polymerových článků s nastavitelným napětím, nadproudová ochrana cívek motoru a následné vyhodnocení získaných signálů. Primární hlídací obvody by měly správně fungovat v režii řídicí jednotky, ale pokud by systém selhal, je vhodné nejnutnější části duplikovat na základní hardwarové úrovni.

Proudovou ochranu motorového vinutí, spínacích prvků, plošného spoje, vedení.. zajišťuje proudový senzor INA21x. Tento obvod podle obrázku 4.8 lineárně převádí nepatrný úbytek na bočníku vedení řádově z mV na napěťový signál až shora limitující napájecím napětím 3,3 V. Pro součástku INA214 odpovídá zesilovací koeficient (Gain faktor) $100 \text{ V} \cdot \text{V}^{-1}$ a vstupní impedance svorek $20 \text{ k}\Omega$. Naměřený, zesílený signál je přiveden do zpětnovazebního komparátoru a patřičně vyhodnocen [9].



Obrázek 4.8 - Měření vazby mezi úbytkem na bočníku (U_{SENS}) a výstupním napětí (U_{OUT}) - senzor INA213

Ve smyslu odporového bočníku (kdy je primární snahou minimalizovat veškeré nadbytečné úbytky) může zpravidla logičtěji figurovat odměřená měděná cesta mezi napájecí svorkou a rozcestím okolo mosfetů. Její odpor a přeneseně i napěťové úbytky

definují známé vztahy pro výpočet odporu na jednocestném vedení a Ohmův zákon. Rovnice 3 až 5. Symbol ρ zde zastupuje měrnou rezistivitu vodiče (pro měď při teplotě 20 °C s hodnotou $0,0178 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$), S obsah kolmého průřezu vodiče a l jeho celkovou délku. V návrhu DPS se využívá šířka měděné cesty 2,50 mm s typickou silou plátování 18 nebo 35 μm (výrobně volitelné) a efektivní délkou 8,20 mm. Tabulka 4.3 názorněji shrnuje výsledné rozdíly vycházející z odlišností v délkách měděných cest (řádově pro desetiny milimetrů) a pro různé citlivosti měření (volbou součástek INA21x). Zaznamenané hodnoty jsou kalkulovány pro průřez měděné cesty $0,045 \text{ mm}^2$ (Cu plátování 18 μm) a maximální předpokládaný proud 8 A. Všechna uvedená čísla ve sloupcích výstupních hodnot nad napájecí mezí 3,3 V jsou saturována právě na tuto hranici. INA210 může mít vliv pro zvýšení citlivosti při nižších pracovních proudech, ale naopak i pro technologicky zvolenou cestu se silou měděného plátování DPS 35 μm .

$$S_{Cu} = \text{šířka Cu} \cdot \text{síla plátování} = 2,5 \cdot 18 \cdot 10^{-3} = 0,045 \text{ mm}^2 \quad (3)$$

$$R_{v20} = \rho \frac{L_{Cu}}{S_{Cu}} = 0,0178 \cdot \frac{8,2 \cdot 10^{-3}}{0,045} = 3,240 \text{ m}\Omega \quad (4)$$

$$U_{out\ INA} = R_{v20} \cdot I_{max} \cdot G_{INA213} = 3,24 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 50 = 1,296 \text{ mV} \quad (5)$$

Tab. 4.2 - Průřezy měděných cest DPS pro plátování 18 a 35 μm

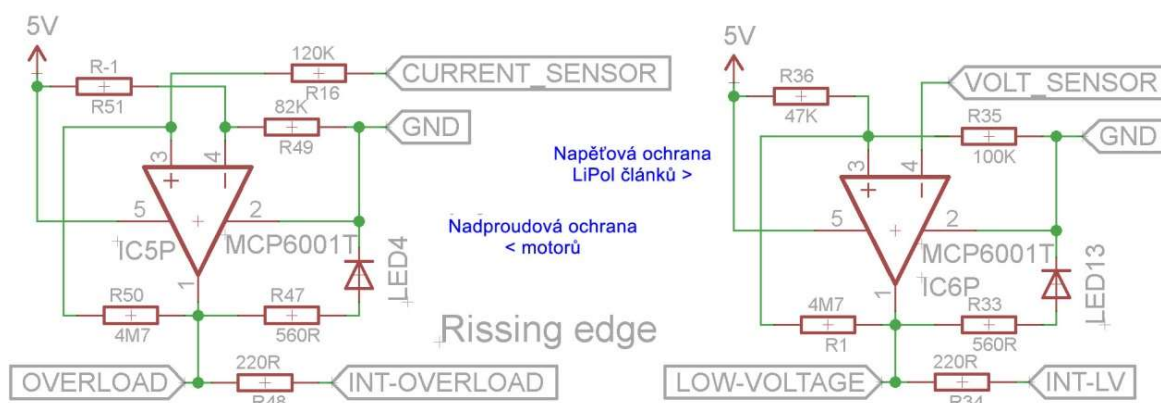
Šířka [mm]	Průřez měděných cest [mm ²]	
	síla Cu 18 μm	síla Cu 35 μm
2,2	0,040	0,077
2,3	0,041	0,081
2,4	0,043	0,084
2,5	0,045	0,088
2,6	0,047	0,091
2,7	0,049	0,095
2,8	0,050	0,098

Tab. 4.3 - Výpočet odporů a úbytků z délek měděných cest DPS

S = 0,045 mm ² , I = 8 A			INA213	INA214	INA210
Délka [mm]	Odpor [mΩ]	Úbytek [mV]	Výstup [V]	Výstup [V]	Výstup [V]
8,0	3,16	25,3	1,27	2,53	5,06
8,1	3,20	25,6	1,28	2,56	5,13
8,2	3,24	25,9	1,30	2,59	5,19
8,3	3,28	26,3	1,31	2,63	5,25
8,4	3,32	26,6	1,33	2,66	5,32
8,5	3,36	26,9	1,34	2,69	5,38

Vybitím Li-Ion polymerové baterie pod mezní hodnotu (viz. teorie) dochází k jejímu nenávratnému chemicky destruktivnímu poškození. Napěťový hlídací obvod může být navržen zpětnovazebním komparátorem porovnávajícím hodnotu napětí získanou z odporového děliče na napájecí větvi s napětím definovaným pevnou referencí. Zpětná vazba zavádí hysterezi a tím pomáhá předcházet nežádoucím stavům v přechodovém pásmu.

Výstupy obou operačních zesilovačů jsou napojeny do ANDu s invertovanými vstupy obvodu 74VHC541, který napěťově přizpůsobuje a převádí PWM signály řídicí jednotky na vstupy budičů IR2101. Při aktivaci ochran (jedné ale i obou zároveň) jsou nastaveny výstupy 74VHC541 na vysokoimpedanční, čímž dojde k automatickému odpojení procesorových řídicích PWM signálů. Podle blokového diagramu budičů uvedeného v datasheetu se předpokládají vstupy H_{IN} a L_{IN} vnitřně přiuzemněné pomocí Pull-Down rezistorů. Od takto nastavené ochrany na základní hardwarové úrovni se očekává modulační (vypínací) příspěvek superponovaný k řídicím PWM signálům. V Praxi to reálně odpovídá omezování krouticího momentu motorů v případě jejich přetížení anebo vybití baterie. Zásahy zmíněných ochran do plynulosti řízení jsou signalizovány odpovídajícími LED diodami. Velmi jasná červená značí kritické nabití akumulátorů (respektive nutnost jejich dobití) a naopak jasná modrá zase dosažení maximálních výkonnostních limitů. Uživatel by tedy při provozu měl věnovat pozornost zejména pouze červené LED diodě. Modrá je jen informační a jejím trvalým svícením nehrozí zničení elektroniky, vedení a ani motorů.



Obrázek 4.9 - Schéma struktury komparátorů ochranných prvků

4.6. Návrh plošného spoje

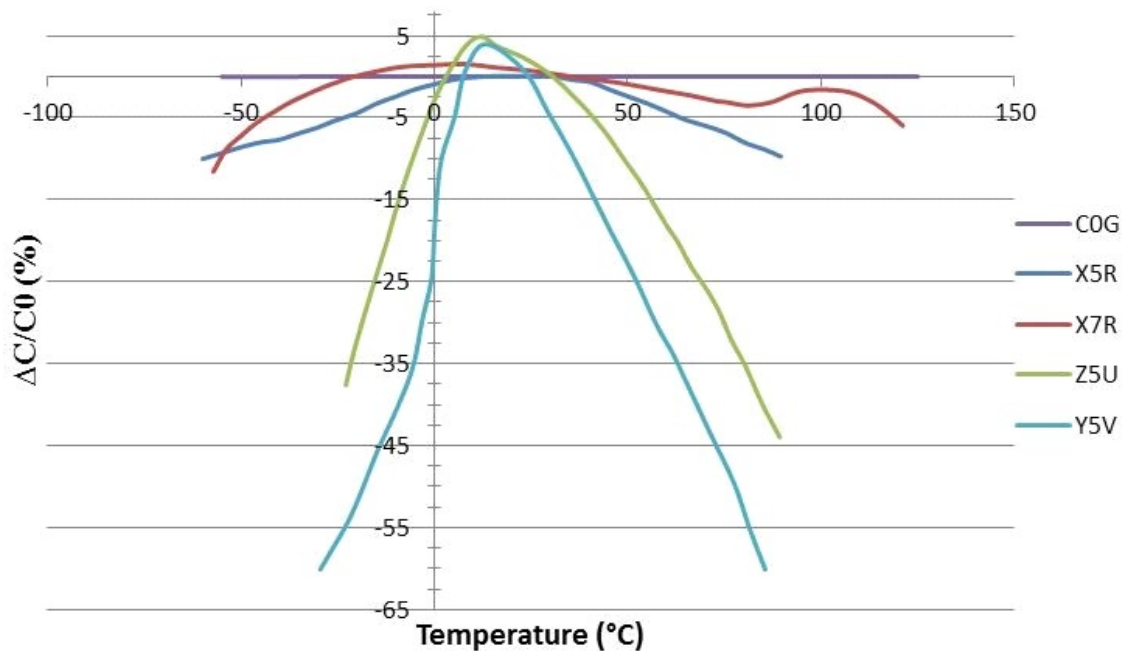
Rozložení funkčních bloků na desce plošných spojů nemůže být zcela náhodné. Úkolem měniče je pulzně šířkově modulované ovládání výkonových spínacích prvků. Nosná PWM frekvence se předpokládá v rozmezí od 2 kHz do 5 kHz (podle využití řídicí jednotky) s proudovými rázy limitujícími na 10 A. V interakci s indukčním charakterem zátěže lze očekávat generování velmi silného elektromagnetického rušení. Návrh musí proto respektovat základní pravidla elektromagnetické kompatibility (EMC), tedy nesmí ovlivňovat jiný objekt, včetně sebe samotného a musí odolávat působení ostatních zdrojů. EMC se tedy dělí na dvě podkategorie: [10]

- EMI - elektromagnetická interference (rušení)
- EMS - elektromagnetická susceptibilita (odolnost)

Základním návrhovým pravidlem, předcházejícím rušení, je striktně oddělené umístění výkonových prvků od (řídících) slaboproudých. Spojovací měděné cesty by měly být, kvůli indukujícím se proudům co nejkratší (využívající zkosení) a proto je důležité věnovat pozornost i logice sdružování sousedních součástek. Svou významnou roli hraje i doplňující element nazývaný rozlitou měď, který je připojen na napájecí (zpravidla tedy zemnicí) polaritu zdroje. Záporný pól baterie by neměl tvořit smyčku spojující výkonové a slaboproudé obvody, ale měl by být duplikován a doplněn LowESR kondenzátory (obvykle s dielektrikem C0G nebo X7R pro MLCC typy). Nízké kapacity mají nižší vnitřní odpory a tím jsou schopny filtrovat vysokofrekvenční rušení, zatímco elektrolytické snižují kolísání vstupní napájecí části.

Minimalizací desky plošných spojů (DPS), zejména v oblasti výkonové elektroniky dále roste vzájemná tepelná interakce součástek. Hned prvním krokem navrhování, tedy již při rozmisťování je potřeba si předem uvědomit, které součástky jsou významnými zdroji oteplení (jak je případně chladit), které jsou tepelně závislé / nezávislé, jak se mění jejich chování, kde se pohybují kritické zlomové hodnoty. Nejzastoupenější rezistory výrobce Royal Ohm v SMD pouzdrech 0402 využívají odporové slitiny stabilní do 150 °C, dielektrikum tantalových kondenzátorů snese 125 °C, obdobně jsou na tom i křemíkové logické obvody. Zajímavé je ovšem chování vysokokapacitních MLCC kondenzátorů, kdy ohřátím na pouhých 80 °C klesá hodnota jejich kapacity hned

o 20 % původní. Nejzrádnější ale bývají nevhodně umístěné elektrolytické kondenzátory. Výrobce deklaruje provozní teplotu dosahující 100 °C, jenže při takovémto dlouhodobém využívání (řádově jednotky roků) vysychá dielektrický rosol a tím postupně ztrácí své klíčové vlastnosti.



Obrázek 4.10 - Poměrná změna kapacit MLCC kondenzátorů v závislosti na teplotě

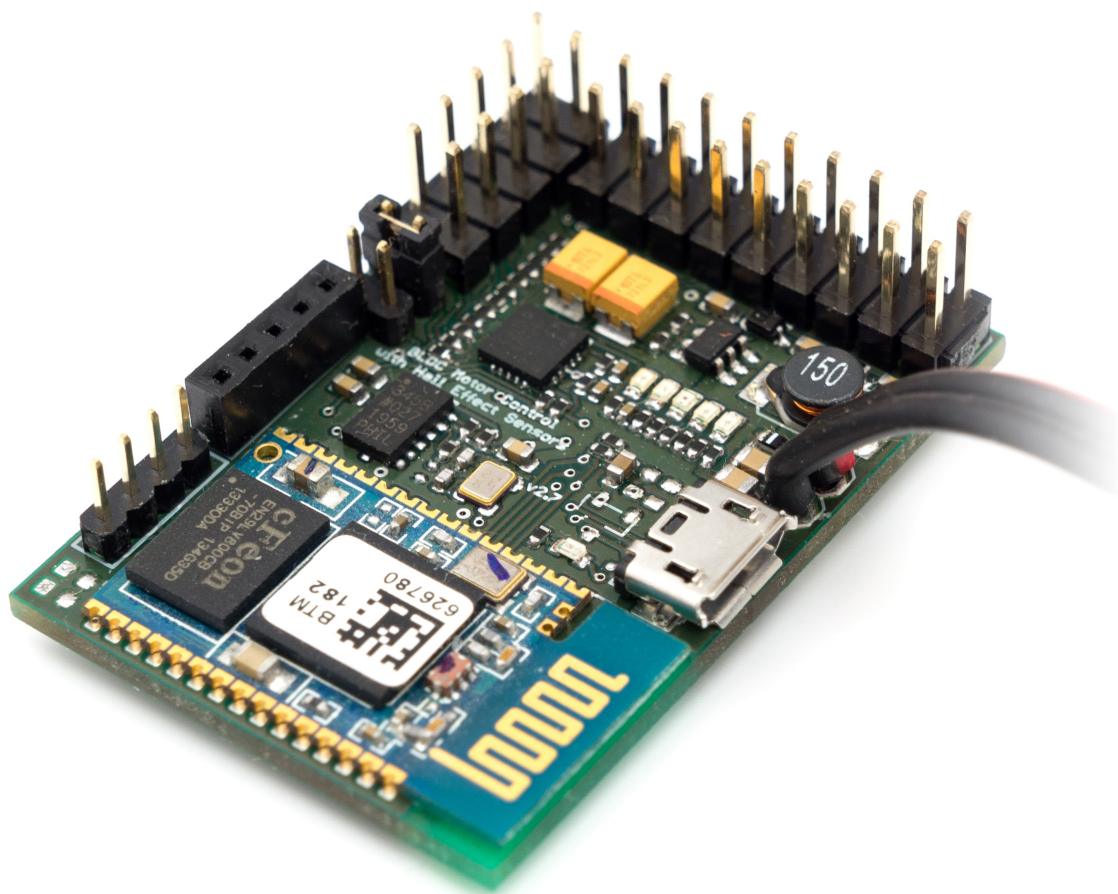
Zdroj: <https://eewiki.net>

Disipativní tepelné ztráty spínacích prvků navrženého můstku, při teoreticky dimenzovaném odběru 10 A, jsou v obvodu zcela nejzásadnější. Pro klidové stavy se rovnají součinu vnitřního odporu a kvadrátu proudu, tedy s $R_{DS(on)} = 3,4 \text{ m}\Omega$ vychází úbytek 340 mW. Ve vedení jsou aktivní křížem vždy dva tranzistory, proto je nutné výsledek uvažovat dvojnásobný. Zásadní ztrátovou složku hrají i přechodové děje, kdy může celkový úbytek dále značně vzrůst. Obvykle platí souvislost porovnávající vnitřní odpor $R_{DS(on)}$ se vstupními kapacitními vazbami C_{iss} , konkrétněji s klesajícím odporem naopak roste vstupní kapacita. Vzhledem k multiplexování tří fází se generované tepelné ztráty rovnoměrně rozprostírají mezi šest pouzder mosfetů. Deska plošných spojů využívá rozlité mědi s odstraněnými termálními můstky pro samochladicí efekt.

$$P_{FET} = R_{DS(on)} \cdot I_{max}^2 = 3,4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2 = 340 \text{ mW} \quad (6)$$

5. Návrh centrální řídicí jednotky

Návrh centrální řídicí jednotky pro ovládání BLDC motorů vzniká na základě požadavků modularity jako samostatná jednotka, která volně navazuje na již existující systém třífázových můstků. Můstky v principu zastávají pouze funkci výkonového spínacího prvku se základními ochranami na hardwarové úrovni. Jejich rozšiřující nadstavbou je pak řídicí člen implementující motorové senzory, poziční senzory, vstupně-výstupní datové porty, komunikační a záznamové periferie, včetně mikroprocesorového jádra. Mezijednotkový interface pracuje univerzálně s 3,3 V logikou, což zajišťuje vzájemnou kompatibilitu mezi funkčními bloky bez nutnosti složitějšího napěťového přizpůsobování, a tím i otevírá potenciální možnost jejich pozdějšího sloučení. Kombinace duálních třífázových můstků s odpovídající řídicí jednotkou posouvá význam aplikace pod celkové zastřešení třífázových měničů.



Obrázek 5.1 - Výsledná funkční verze centrální řídicí jednotky

5.1. Napájení - DC/DC měnič

Přestože funkční jednotky vznikají dle požadavků zatím jako zcela oddělené nezávislé bloky, později po hlubším otestování se uvažuje jejich potenciální sloučení. Tomu odpovídají i totožné charakteristické rysy společných částí, včetně napájecí části. Jak již v předchozí kapitole 4.2 detailněji zaznělo porovnání klíčových předností jednotlivých stabilizátorů, i zde napájecí část zastoupí spínaný DC/DC měnič založený na totožném „step-down“ regulátoru MCP16301. Součástka je podle dokumentace dimenzována na trvalý výstupní proud 600 mA, což spolehlivě pokrývá maximální špičkové potřeby obvodu, které nyní vzrostly přibližně na 116 mA. Ke změnám dochází pouze ve feritové tlumivce původně osazené v univerzálním pouzdře 1210 s udávanou zatížitelností 130 mA za vinutou tlumivku DL16 s nominální zatížitelností 1,2 A. Jejich indukčnosti 15 μH ovšem zůstávají zachovány. Pro nastavení DC/DC regulátoru podle uvedených parametrů ($U_{\text{OUT}} = 3,3 \text{ V}$, $I_{\text{OUT}} = 150 \text{ mA}$, $L = 15 \mu\text{H}$, $C_{\text{OUT}} = C_{\text{IN}} = 2 \cdot 10 \mu\text{F}$ X7R keramické kondenzátory) odpovídá jeho pracovní rezonanční frekvence 500 kHz. S ní je nutné pracovat při správném dimenzování a rozmístění blokačních kondenzátorů. Pokud se frekvenční rušení při nedostatečné filtraci přeneso do jakékoli využití datové komunikace (I²C, SPI, UART) nebo hůře pronikne napájením do mikroprocesorů, znefunkční více či méně závažněji celou řídicí jednotku.

Tab. 5.1 - Proudové náročnosti elektroniky řídicí jednotky

Součástka	Počet	Proud [μA]	Celkový proud [mA]
74HC1G32	2	20	$40 \cdot 10^{-3}$
ADXL345	1	23	$23 \cdot 10^{-3}$
MMC	1	12	$12 \cdot 10^{-3}$
PIC16LF1559	1	75	$75 \cdot 10^{-3}$
dsPIC33EP256MU810	1	190	$190 \cdot 10^{-3}$
BTM182	1	$58 \cdot 10^3$	58
SS341RT	6	$3,5 \cdot 10^3$	21
LED	6	$5,0 \cdot 10^3$	35
Pull-UP / Pull-DOWN	-	-	0,5
Celková maximální spotřeba elektroniky:			$\sim 116 \text{ mA (400 mW)}$

5.2. Tříosý akcelerometr pro mapování terénu

Pro úlohu plnohodnotného řízení asistovaného pohonu vozíku (přeneseně kočárku) se vyžaduje zajištění kontinuálního snímání polohy natočení. V současné moderní elektronice (stabilizační systémy kvadrokoptér, obrazové systémy fotoaparátů..) se pro detekci orientace efektivně využívá akcelerometrů, tedy elektromechanických součástek převádějících zrychlení v odpovídajících osách na napěťový signál. Akcelerometry jsou konstruovány podle charakteru výstupních signálů jako analogové, kde míru zrychlení reprezentuje lineární spojitá hodnota napětí (2,5 V - 0 G / 2,6 V - 0,5 G / 2,7 V - 1 G) anebo jako digitální s pulzně šířkovou modulací, případně komunikační sběrnici. Získaný datový signál obsahuje komplexní soubor statické a dynamické informace. Statická měření gravitačního zrychlení vypovídají o úhlu natočení aktivních struktur senzoru vzhledem k zemskému povrchu, zatímco dynamická analyzují směr, kterým se zařízení pohybuje.

Z širokého prodejního sortimentu byl vybrán pro svou obsáhlou podporu tříosý digitální akcelerometr ADXL345. Jedná se o nízkopříkonový 3,3 V senzor s rozlišením 13 bitů, což umožňuje měření v rozsahu od dvojnásobku normálního tíhového zrychlení (označováno ± 2 G) až po maximální dostupnou hranici ± 16 G. Převedením na fyzikálně ekvivalentní jednotky (3,9 mG / LSB) vychází zaznamenanatelná rozlišovací schopnost sklonu menší než $1,0^\circ$. Digitální výstup je formátován jako 16 bitový dvojkový doplněk přístupný buď (tří / čtyř drátově) přes SPI nebo rozhraním I²C. Senzor dále zahrnuje několik speciálních rozšiřujících funkcí - snímání aktivity, detekce přítomnosti nebo nedostatku pohybu, porovnávání zrychlení s uživatelsky definovanými referenčními prahy.. Tyto funkce mohou být mapovány individuálně a přivedeny na jeden z výstupních pinů určených pro externí přerušení. Integrovaný 32 úroňový systém řízení paměti typu FIFO slouží ve smyslu vyrovnávací paměti pro ukládání dat, aby se minimalizovala aktivita hlavního procesoru a tím snížila celková spotřeba energie [11]

Díky akcelerometrické informaci může řídicí jednotka lépe chápat strukturu terénu a tím pozitivně ovlivnit řízení.

5.3. Přednostní aspekty volby procesoru

Jednočipové mikroprocesory PIC firmy Microchip Technology se řadí mezi programovatelné polovodičové součástky. Jsou dostupné 8 bitové (PIC10, 12, 14, 16, 18), 16 bitové (PIC24), 16 bitové digitální signálové (dsPIC30, dsPIC33F) a 32bitové (PIC32) řady. Vyznačují se Harvardskou architekturou, tedy strukturálně oddělenou programovou a datovou pamětí. Základní strojové instrukce jsou zastoupeny nižším počtem (35-70) pevné délky (RISC). Většina instrukcí je vykonávána v jediném hodinovém cyklu. Na rozdíl od mnoha jiných procesorů se zde shodují vnitřní struktury registrů i pamětí, neboť oba systémy pracují s totožným paměťovým médiem RAM. Unikátní vlastností PICů je jejich konstantní, velmi rychlá odezva na zdroje přerušení, která konkrétně trvá tři instrukční cykly.

Vhodný výběr procesorů vymezují přednostně zejména klíčové parametry v oblasti dostupného počtu pulzně šířkových kanálů. PICy jich obvykle nemívají nijak mnoho. Pro úlohu řízení asistovaného pohonu vozíku se k řídicí jednotce připojují dva moduly výkonových třífázových můstků - obě zadní kola jdou poháněna nezávisle, samostatně. Z první kapitoly Bezkomutátorové stejnosměrné motory již detailněji známe vnitřní elektronickou strukturu implementovaných BLDC motorů, ze třetí kapitoly Teorie řízení pak i možnosti jejich ovládání. Vždy se jedná o třífázové statorové vinutí rozložené na šest pólových nástavců, které je pro dosažení točivého magnetického pole nutné elektronicky komutovat (přepínat). Možnosti komplementárního spínání jednotlivých fází vycházejí z principu H-můstku a umožňují obousměrnou aktivaci příslušných cívek. Tím se definuje základní úhel pootočení permanentního rotorového magnetu (potažmo hřídele) o 60°. Cívky jsou výkonově napájeny křížovým spínáním tranzistorů sousedních větví, to znamená, že při vedení proudu se v rámci jedné otáčky vzájemně střídají a tím pádem je nutná aktivní obsluha šesti mosfetů v reálném čase. Pro dva třífázové můstky se tedy od řídicí jednotky vyžaduje dostupnost dvanácti kanálů pulzně šířkové modulace. Aktuální trh (výběrově omezeno osobními preferencemi pouze na procesory PIC) nabízí pro vyhledávání >12 PWM výstupů konkrétně patnáct typů 8 bitové řady PIC16 a z 16 bitové řady pak čtyři dsPIC30 a padesát čtyři dsPIC33. Omezením na minimální potřebný počet I/O pinů vycházející ze schématu zapojení, optimálním napájecím napětím 3,3 V, dostupnými potenciálně hodicími se periferiemi (UART, SPI, I²C) se celkový počet redukuje na 49 součástek. S rozšířením požadavku o podporu rozhraní

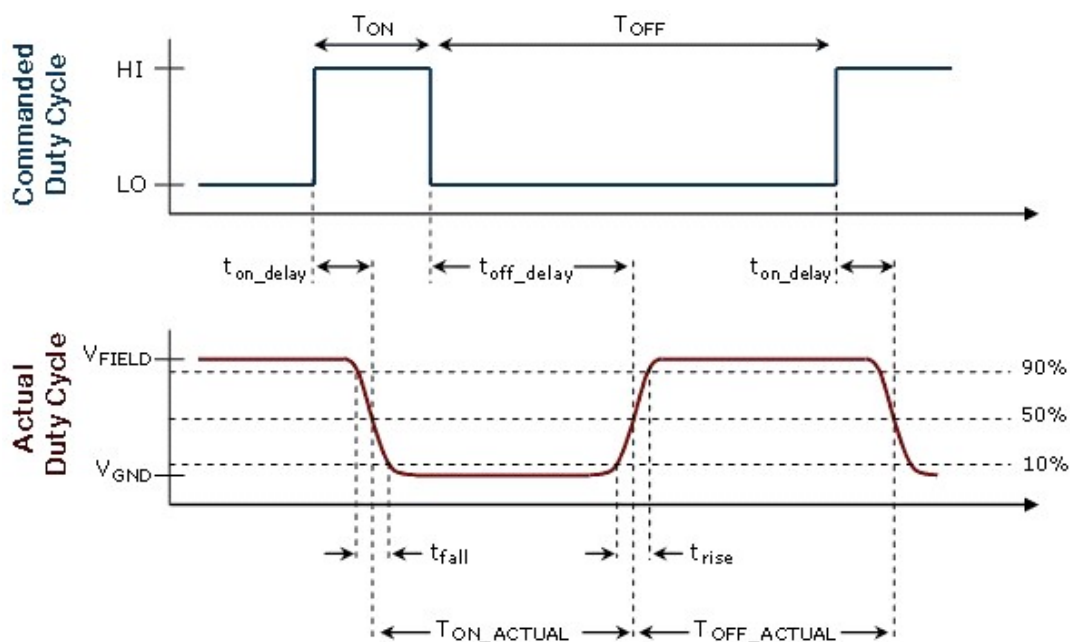
USB 2.0 OTG (On-The-Go), tedy možností komunikace i ve smyslu hostitelského zařízení pro další USB přístroje (flash disk, myš, klávesnice..) zbývá z původního výběru pouze pět 16 bitových signálových mikroprocesorů, přičemž fyzicky se jedná o jeden s různými nepatrnými modifikacemi (počet výstupů / typ pouzdra TQFP 64, 100, 144, velikost programové paměti a paměti RAM). Nastavením internetových online filtrů (<http://www.microchip.com/ParamChartSearch/chart.aspx>) podle předchozích kritérií se výběr specifikuje konkrétně na digitální signálový procesor dsPIC33EP256MU810 (včetně jeho ekvivalentů) [12].

Signálové procesory jsou mimo jiné velmi zajímavé i díky implementaci široké škály speciálních funkcí. Nejzásadnější úskalí třífázových můstků (přeneseně pak i celého měniče) vyplývají z bezpečnosti spínání výkonových prvků. Pokud by se softwarovou chybou (uživatelsky špatně napsaný program, neočekávané vnější jevy) otevřely oba tranzistory jedné větve H-můstku současně, došlo by k přímému průchodu maximálního napájecího výkonu a tím i potenciálnímu zničení elektroniky včetně DPS. Pro unikátně vyvinutý koncept můstků, uvedený ve čtvrté kapitole, by ale reálně měla zasáhnout bezpečnostní ochrana na hardwarové úrovni a limitovat maximální možný proud celé jednotky na přednastavenou mez. Ovšem i při programově teoreticky správném přepínání PWM signálů, kdy je naprosto striktně zachováno křížové pravidlo ovládání, naráží problematika na jisté fyzikální limity. Výkonové spínací prvky (konkrétně využité BSC034N) jsou díky své vysoké kapacitě vnitřních PN přechodů pro digitální ovládání relativně pomalé. S parametry $U_{DD} = 15 \text{ V}$, $U_{GS} = 10 \text{ V}$, $I_D = 30 \text{ A}$, $R_{G,ext} = 1,6 \Omega$ jsou pevně spjaty časové dynamické charakteristiky, mezi které patří prodleva při zapínání $t_{d(on)}$, doba náběhu t_r a zrcadlově pak prodleva při vypínání $t_{d(off)}$ a doba sestupu t_f .

Tab. 5.2 - Kapacitní a časové spínací parametry mosfetu BSC034N

		$U_{GS} = 0 \text{ V}$, $U_{DS} = 15 \text{ V}$, $f = 1 \text{ MHz}$ Jednotka [pF]	Typ	Max
Input capacitance	C_{iss}		3200	4300
Output capacitance	C_{oss}		1000	1300
Reverse transfer capacitance	C_{rss}		62	-
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$U_{DD} = 15 \text{ V}$, $U_{GS} = 10 \text{ V}$, $I_D = 30 \text{ A}$, $R_{G,ext} = 1,6 \text{ W}$	6,9 ns	
Rise time	t_r		4,8 ns	
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		28,0 ns	
Fall time	t_f		4,6 ns	

Uvažujeme-li ze schématu (obrázek 4.5) výřezově jakýsi výchozí provozní stav můstku, kdy je vrchní tranzistor aktivně sepnutý, zatímco spodní téže větve vypnutý, při odpojení fáze motoru jimi neteče žádný proud. Jinak je tomu už ale při překlápění do reverzního stavu, které vyvolává matematicky složitěji popsatelné přechodové děje. Současným přivedením (podle taktování kontroléru maximálně s rozdílem řádově několika jednotek ns) signálu na Gate obou mosfetů se začnou přepínat. Spínání spodního až do svého plného otevření bude trvat součet časů $t_{d(on)}$ a $\frac{1}{2} t_r$, tedy 9,3 ns. Vypínání horního se zpozdí o součet $t_{d(off)}$ a $\frac{1}{2} t_r$, tedy 30,3 ns. Po průměrnou dobu 21 ns jsou zkratově aktivní oba prvky. Nejedná se o přímý zkratový efekt, neboť je nutné do výpočtů zanést i reálné tvary spínacích / vypínacích křivek, nicméně trvání překryvu generuje ztrátové výkony, které se negativně projevují zvýšenou spotřebou elektrické energie z akumulátorů a přeneseně pak i tepelnými účinky.



Obrázek 5.2 - Obecný časový průběh spínání mosfetů // Zdroj: www.mosaic-industries.com

5.3.1 Signálový procesor dsPIC

Jak již bylo naznačeno, digitální signálové procesory obvykle vynikají speciálními funkcemi a i pro popsanou problematiku již tedy existují konstrukčně před-implementovaná řešení. Volbu procesoru dsPIC33EP256MU810 opodstatňuje především zejména jeho charakteristická vlastnost vysokorychlostních PWM

výstupů. Modifikované pulzně šířkové ovládání totiž ve svém základu rozšiřuje hardwarovou podporu konkrétně pro ACIM (AC Induction Motor), SRM (Switched Reluctance Motor), PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor), ale samozřejmě také i pro BLDC motory (Brushless DC Motor). Tyto výstupy mohou fungovat individuálně vzájemně nezávisle anebo mohou být softwarově komplementárně sdruženy do šesti synchronních párů (PWMxL / PWMxH). Aktivní režim sdružení signálů předpokládá ovládání motorů a tedy i využití můstků. Jejich výše detailněji popsaná problematika spínání v oblasti přechodových jevů se zde elegantně řeší automatickým vkládáním neaktivních časů („Dead Time“) včetně kompenzací pro vzestupné i sestupné hrany - eliminace softwarových chyb.

Operating Conditions

- 3.0V to 3.6V, -40°C to +125°C, DC to 60 MIPS
- 3.0V to 3.6V, -40°C to +85°C, DC to 70 MIPS

Core: 16-bit dsPIC33E

- Modified Harvard Architecture
- C Compiler Optimized Instruction Set
- 16-bit Wide Data Path
- 24-bit Wide Instructions
- 16x16 Integer Multiply Operations
- 32/16 and 16/16 Integer Divide Operations
- 11 Additional Instructions
- Two 40-bit Accumulators with Rounding and Saturation Options
- Flexible and Powerful Addressing modes
- Single-Cycle Multiply and Accumulate
- Single-Cycle shifts for up to 40-bit Data
- 16x16 Fractional Multiply/Divide Operations

Motor Control PWM

- Two master time base modules can control dual 3-phase motors simultaneously
- Up to seven PWM generators
- Two PWM outputs per PWM generator
- 8.32 ns PWM resolution

Quadrature Encoder Interface (QEI)

- 32-bit position counter
- 32-bit Index pulse counter

Advanced Analog Features

- Two independent ADC modules:
 - One ADC configurable as 10-bit, 1.1 Msps with four S&H or 12-bit, 500 ksps with one S&H
 - One 10-bit ADC, 1.1 Msps with four S&H
 - Eight S&H using both ADC 10-bit modules
 - 24 analog channels (64-pin devices) up to 32 analog channels (100/121/144-pin devices)
 - Flexible and independent ADC trigger sources
- Comparators:
 - Up to three Analog Comparator modules
 - Programmable references with 32 voltage points

Direct Memory Access (DMA)

- 15-channel DMA with user-selectable priority arbitration
- UART, USB, SPI, ADC, ECAN, IC, OC, Timers, DCI/I2S, PMP

Architecture	16-bit
CPU Speed (MIPS)	70
Memory Type	Flash
Auxiliary Flash (KB)	24
Program Memory (KB)	256
RAM Bytes	28,672
DMA RAM Bytes	4096
Temperature Range C	-40 to 125
Operating Voltage Range (V)	3 to 3.6
I/O Pins	83
Pin Count	100
System Management	BOR
Features	
POR	Yes
WDT	Yes
nanoWatt Features	Low Sleep/Fast Wake/Fast Control
Digital Communication	4-UART
Peripherals	4-SPI
	2-I2C
Codec Interface	Yes
Comparators	3
USB (ch, speed, compliance)	1, FS Device/Host/OTG, USB 2.0 OTG
CAN (#, type)	2 CAN
Capture/Compare/PWM	16/16
Peripherals	
PWM Resolution bits	16
Motor Control PWM	12
Channels	
Quadrature Encoder	2
Interface (QEI)	
Timers	9 x 16-bit 4 x 32-bit
Parallel Port	PMP
DMA	15
Cap Touch Channels	32

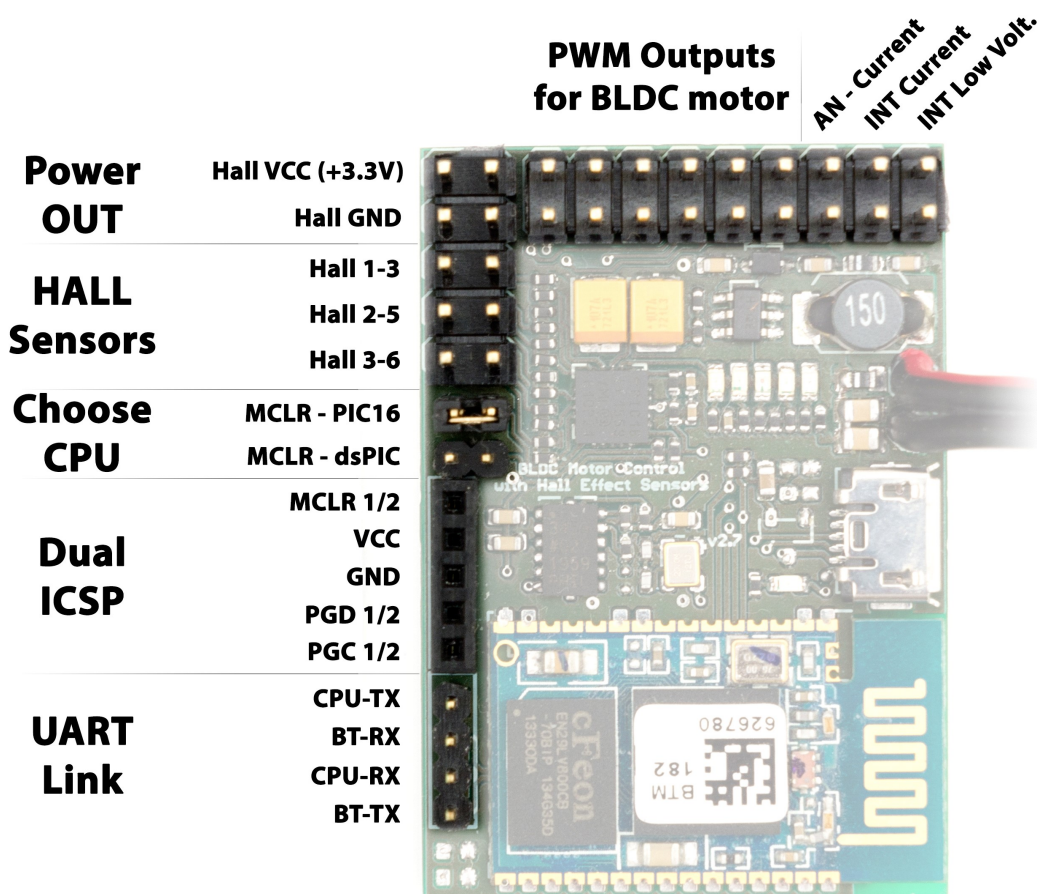
Timers / Capture / Compare / Standard PWM

- 9 16-bit Timers/Counters.
- 16 Input Capture
- 16 Output Compare/ PWM
- Hardware Real-Time Clock and Calendar
- Peripheral Pin Select (PPS) to allow function remap

Obrázek 5.3 - Technická specifikace dsPIC33EP256MU810 // Zdroj: <http://www.microchip.com>

5.4. Význam a vyhodnocení vstupních signálů

Plošný spoj centrální řídicí jednotky zahrnuje ve své konektorové výbavě, kromě napájecí a signálové výstupní svorky pro dvanáct PWM signálů ještě další dvě zatím nepopsané sady vstupů - provozní signály třífázových můstků a aktuální stav natáčení hřídelí obou BLDC motorů.



Obrázek 5.4 - Rozmístění a význam konektorů centrální řídicí jednotky

Bezpečnostní ochranný systém elektroniky třífázových můstků proti výkonovému přetížení zajišťuje proudové čidlo INA214. Jedná se o speciální modifikovanou variantu operačního zesilovače s lineárním zesílením $100 \text{ V} \cdot \text{V}^{-1}$, který je schopen převádět nepatrný napěťový úbytek vytvořený průchodem proudu bočníkem na plnohodnotný signál v celém napěťovém rozsahu. V souladu s předchozími výpočty odpovídá při volbě měděného plátování DPS $18 \mu\text{m}$ a protékaném proudu 8 A výstupní hodnota senzoru $2,59 \text{ V}$. Tato informace přeneseně reprezentující fyzické zatížení konkrétního motoru kola vozíku je centrální řídicí jednotce přístupná ve své nezměněné analogové hodnotě na pinu (dle schematického výkresu označovaném) jako „AN - Current“.

Signál v rámci elektroniky můstku dále slouží zpětnovazebnímu komparátoru s operačním zesilovačem MCP6001T, který jej pro další potřeby obvodu dvouúrovňově digitalizuje. Přednastavenou referenční hodnotu U_{REF} doplňuje hysterezní křivka s výkmitem 92 mV, zajišťující strmé bezoscilační průchody nulou. Potřebám externího přerušení je tento logický výstup také vyveden (INT - Current). Aby nedocházelo nesprávnou manipulací k ovlivnění systému hardwarových ochran, jsou oba uvedené signály dostupné přes rezistory 4,7 kΩ.

Primární úloha vyvíjené elektroniky spočívá zejména v generování akčních zásahů ovlivňujících plynulost a celkový styl jízdy asistovaného pohonu vozíku (kočárku). Aby jednotka mohla dynamicky s přínosem vstupovat do řízení, nestačí pouze tříosé akcelerometrické mapování terénu a doplňující zátěžová informace z motorů, je ale také nutné zajistit signály týkající se vzájemné pozice statorového a rotorového natočení. Z teoretické části této práce vycházejí dvě základní metodiky snímání - bezsenzorové a senzorové. Bezsenzorovou lacinější variantu motorů musí zákonitě doplňovat propracovanější složitější elektronika schopná získávat provozní informace vždy z neaktivní volné fáze. Charakter takového řízení nachází uplatnění zejména pro vysokootáčkové stroje bez prudkých změn zatížení - ventilátory, čerpadla.

Senzorové řízení vhodné pro ostatní aplikace a tedy i pro pohon kočárku se naopak zakládá na implementaci tří pozičních prvků rozmístěných po 120°. Polohu vzájemného natočení z principu magneticky zaznamenávají Hallovy senzory s výstupy dvou typů. Podle uvážené volby výrobce (z předpokladu jejich využití) bývají dostupné konstrukce s analogovými i digitálními výstupy. Analogové při odpovídajícím speciálním zpracování mohou mapovat polohu podrobněji, zatímco digitální jednoznačně pevně strukturují vymezený prostor na šest sektorů po 60°. Využité typy BLDC motorů (HL10G) výrobce UUmotor pracují s digitálními unipolárními čidly SS441, na které jsou uzpůsobeny obecně i vstupní piny „Hall 1-6“ řídicí jednotky, včetně příslušného napájení.

Obrázek dále zachycuje propojovací / konfigurační rozhraní UART mezi Bluetooth modulem a signálovým mikroprocesorem, ale také i programovatelná rozhraní, na která přijde řeč později.

5.4.1 Funkce procesoru PIC16

Jak již bylo zmíněno, asistovaný pohon vozíku je založen na dvou senzorových BLDC motorech s unipolárními čidly SS441R. Jejich digitální výstupy spočívají v principu zapojení s otevřeným kolektorem, tedy s nutností připojení externích zvedacích Pull-Up rezistorů. Takto oddělená elektronika umožňuje rozdílné napájecí napětí pro IC (v rozmezí od 3 do 24 V) a nezávislé datové sběrnice. Bezzákmitovou digitalizaci signálu se strmým průběhem zajišťuje kombinace analogového Hallova čidla s implementovaným operačním zesilovačem v jednom pouzdře součástky.

Signálový procesor dsPIC specializovaný na sdružené motorové PWM výstupy, bohužel ztrácí důležité vlastnosti v jiné oblasti - přerušení. Logika senzorového řízení spočívá v uzavřeném regulačním procesu využívajícím přínosu zpětné vazby. Algoritmicky v prvním kroku dochází k vyčtení poloh vzájemného rotorového a statorového natočení. Na základě binárních informací Hallových senzorů se zvolí příslušný řádek definované LUT tabulky (Lookup table) šestikrokové komutace a prostřednictvím PWM modulací se posléze aktivují odpovídající fáze motorů. Vzhledem k požadavkům obohacujícím aplikaci o další periferie může být později procesor zaneprázdněn, čímž by řízení utrpělo na plynulosti chodu. Neustálým cyklickým sledováním šesti vstupů (Hall 1-6), zda nedošlo v kombinaci k logické změně, naopak klesá výpočetní efektivita algoritmu. Remapovatelných pinů pro externí přerušení je zde k dispozici pouze pět.

Původní slepá cesta nutnosti redukce pinů přerušení vedla skrze řešení duálních multivibrátorů 74HCT123, které měly při své konfiguraci v reakci na změnu vstupů generovat výstupní pulz externího přerušení. Z datasheetu nebyla jejich funkce jednoznačně definována, simulační program Multisim uvažovanou teorii podpořil, zatímco praxe ji pak striktně zvrátila. Lacinější, modifikovatelnější a zároveň rozměrově mnohem úspornější variantou se stal nízkopříkonový 8 bitový procesor PIC16LF1559 v pouzdře QFN20. Součástka pracuje bez nutnosti externího krystalu stabilně na frekvenci 16 MHz a doplňují ji pouze kondenzátor s rezistorem ve smyslu resetu na pinu RA3/MCLR. Kromě možnosti signalizace zelenou LED diodou mikroprocesor pouze monitoruje binární kombinace pinů Hall 1-6 a v případě jejich změny vygeneruje přerušení hlavnímu procesoru - signál k načtení nových hodnot.

5.5. Komunikační a záznamové periferie

Kromě „strohé“ aplikace měniče (dvou třífázových můstků s řídicí jednotkou) přidává vyvinutá elektronika nad rámec zadání podporu komunikačních a záznamových periférií. Ty se ukazují jako velmi praktický nástroj nejen pro servisní účely během vývoje, ale také zejména i pro pozdější provozní nasazení. Stručným výčtem mezi ně spadá: USB, UART a SPI (MMC).

Podpora USB rozhraní je zde implementována ve verzi 2.0 s rozšířením klasického standartu komunikace typu Master-Slave (Host-Device) o možnost přímého přenosu dat typu bod-bod (Point-To-Point), tedy podobně jako u FireWire. Označením přidané specifikace je technická zkratka OTG (On-The-Go). Jedná se o schopnost vzájemné komunikace dvou periferních zařízení bez intervence počítače nebo jiného nadřazeného systému. Mohou tedy například mezi sebou rovnocenně komunikovat dvě řídicí jednotky nebo pro ukládání dat jednotka s externím (flash) diskem. Rozhraní je přístupno skrze mikro USB konektor s konstrukčním zařazením AB.

Nejvyužívanější bezdrátové spojení jednotky s aplikací v notebooku / smartphonu zajišťuje bluetooth modul BTM-182. Jedná se o externí plnohodnotný komunikační prostředek firmy Rayson s integrovanou anténou přímo na DPS. Zařízení pracuje stejně jako WiFi v ISM pásmu 2,4 GHz. Odolnost proti rušení a zvýšená spolehlivost přenosu paketů vychází z mechanismu FHSS, tedy z přeladování s periodou 625 μ s mezi 79 frekvencemi (krok 1 MHz). Bezdrátové rozhraní spadá do třídy 2.0, která garantuje při anténním výkonu 2,5 mW (4 dBm) spolehlivý dosah ve volném prostoru 10 m. Modulační technika $\pi/4$ -DQPSK zvyšuje datovou propustnost na 3 Mbit \cdot s⁻¹. Mezi procesorem a bluetooth modulem probíhá spojení sériovou linkou RS232, která je i pro potřeby servisních účelů vyvedena na propojovací jumper (CPU-TX/BT-RX, CPU-RX/BT-TX) konektoru UART Link. Servisní konfigurovatelnost spočívá ve volbách externí viditelnosti zařízení, názvu, hesla k připojení, přenosové baudové rychlosti, počtu bitů, úsporných / spánkových režimech (Hold, Sniff, Park, Deep sleep Mode)...

Paměťová karta formátu Micro SD / SDHC (zpětně kompatibilní) slouží jednotce zatím pouze pro záznamy provozních dat tříosého akcelerometru, Hallových senzorů, hodnot vývoje zátěžových momentů BLDC motorů, charakteristik napětí a proudů...

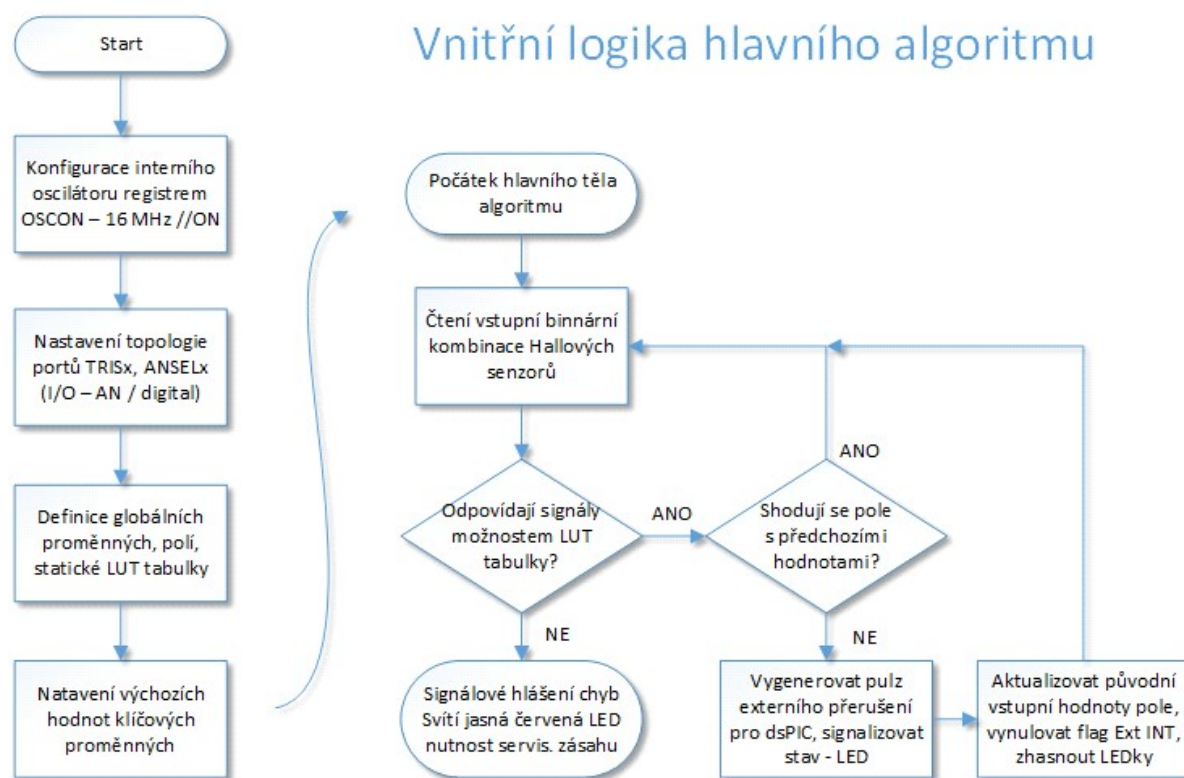
6. Softwarová výbava

V poslední významné části úlohy asistovaného pohonu vozíku zbývá „oživit“ z různých hledisek dosud obsáhle diskutovaný hardware. Korektně psaný program se neobejde bez podrobnější znalosti „železa“, pro které fyzicky vzniká. Mimo omezené definice interfacu, tedy frekvenčním, napětřovém, úrovněm charakteru signálů jednotek... jsou velmi klíčové i ostatní poznatky teoretické části práce. Pro zajištění plynulého a především spolehlivého chodu aplikace musí algoritmus problematiku řízení chápat skrze zmíněné mnohem hlouběji. K prostému definovanému otočení BLDC motorů (je-li na základě spousty sensorů důvod) se například přidružují požadavky jejich dynamických vlastností vycházejících z fyzické stránky konstrukce. Zastavený motor jistě nedokáže synchronně sledovat svižně rotující magnetické pole podobné rozeběhlému stavu, momentová křivka promítnutá v odebíraných proudech také zaujme zcela jiné hodnoty. Akcelerometricky vnímané naklonění terénu ve směru jízdy v koordinaci s uživatelskými pokyny generuje podle smyslu jednou dopředné, po druhé reverzní momenty kol. Ty se navíc vlivem bočního náklonu, rozdílném povrchu včetně adhezních podmínek (asfalt, písek, sníh, led, díry) mohou vzájemně lišit. Úkolem softwarového pozadí elektroniky proto zbývá robustní dynamické přizpůsobování na základě všech dostupných senzorů.

6.1. Dekódování Grayova kódu

Přestože hlavní signálový procesor disponuje pro účely aplikace asistovaného pohonu vozíku naprosto dostatečným paměťovým i výpočetním výkonem, stále se jedná o jednočipové řešení, které by se ve svém základu muselo smířovat s jistými kompromisy. Pokud není umožněno vícevláknové souběžné zpracování signálu (anglicky známé pod termínem Multi Pipeline), dochází vyrovnávacími paměťmi a řadiči k multiplexování vnitřního toku informací. Časovače, PWM modulace, AD převodníky, flagy přerušení a některé komunikace... zvládají pracovat na pozadí zcela nezávisle na chodu hlavního programu, jinak je tomu ale při přerušení. Vstoupením do podprogramu se stává program dočasně slepý vůči všem ostatním aspektům mimo blok vykonávané funkce (s podfunkcemi) a další flagy včetně externích přerušení se podle priorit řadí do front.

Z logiky priorit vycházejí i konkrétní podmínky, kdy do jedné vzájemně navázané komunikace nesmí vstoupit jiná (teplotní čidla s One-Wire rozhraním). Je-li povoleno bezdrátové spojení a jednotka začne vysílat data, případně dojde-li k externí intervenci, rozsáhlejší program obsluhovaný jednočipovým procesorem najednou nedokáže věnovat dostatečnou režii částem kódu hlavního programu - hierarchicky s nejnižší prioritou. Zefektivněním a čistějším způsobem programování se přednostně využívá výhod externích funkcí a také podprogramů v přerušení. Jelikož signálovému procesoru dsPIC chybí ve své výbavě širší zastoupení pinů s možností externích přerušení, doplňuje jej PIC16LF1559. Tím se zcela převádí rutinní úloha monitorování změn binární kombinace všech Halloových senzorů obou BLDC motorů na jeden výsledný pin přerušení evokující přímý požadavek k přepnutí PWM modulací dle následujícího řádku statické LUT tabulky. Zmíněná tabulka lze spolehlivě využít i pro softwarovou kontrolu pozičních senzorů, neboť je sestavena pomocí Grayova kódu, tedy charakteristické vlastnosti bitového vyjádření, kdy se vždy v následujícím kroku mění pouze jedna bitová pozice [13].



Obrázek 6.1 - Blokové schéma dekódování Grayova kódu

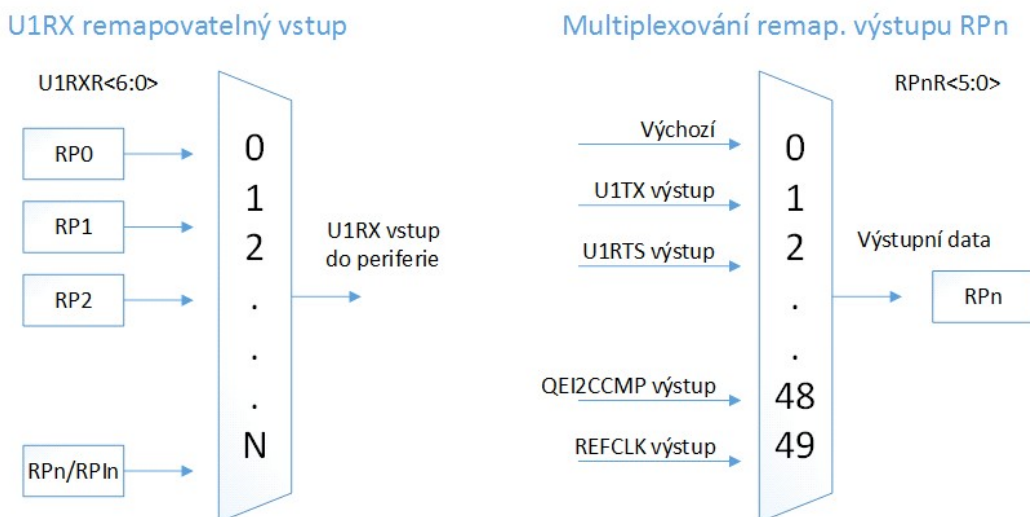
6.2. Algoritmus procesoru PIC16

Blokové schéma dekódování Grayova kódu popisuje strukturu zpracování signálů Hallových senzorů, jejich kontrolu indikující zarušení a generování pulzu pro dsPIC. Po náběhu a stabilizaci napájecího napětí se automaticky spustí připravený program, který v první fázi provede nezbytnou konfiguraci využívaných registrů a inicializuje konfigurační pojistky CONFIGx. Z nejdůležitějších se jedná o Watchdog Timer (nutno manuálně softwarově resetovat - hlídá potenciální zamrznutí programu), Brown-out Reset (při neodpovídajícím průběhu napětí procesor nenaběhne), Flash Program Memory Code Protection (ochrana dat), Oscillator Selection Bits (volba oscilátoru)... Frekvence a další klíčové vlastnosti krystalu se dodefinovávají softwarově registrem OSCCON (Oscillator Control Register) [14]. Topologii portů, přeneseně pak i pinů, zda se mají chovat jako vstupy či výstupy nastavují osmibitové registry TRISx spolu s ANSELx pro volbu AN/Digital. Ostatní vnitřní datové struktury inicializuje kompilátor automaticky a v případě speciálních požadavků probíhá manuální doladění. Výstupními piny jsou ze schématu potřeba zachovat pouze RC4 (INT-HALL) a RC5 (HALL-LED). Neprodleně ihned po konfiguračních pojistkách, které bývají výchozím prvkem nastavení projektu kompilátoru, se inicializují globální proměnné, viditelné napříč celým softwarem.

Hlavním tělem programu, cyklicky uzavřeném v kontinuální smyčce WHILE dochází k vyčítání provozních dat pozičních Hallových senzorů, která jsou na základě předdefinované statické LUT tabulky následně verifikována. Tím se efektivně omezují případné mechanické chyby senzorů, nedokonalosti konektorů nebo vlivy indukovaného rušení datové sběrnice. Neplatné kombinace vstupních binárních slov signalizuje velmi jasná červená servisní LED dioda - nutný zásah technika. Pokud nesvítí, je vše v pořádku a program pokračuje k porovnání hodnot nově získaných polí s původními. Zde může dojít k rozdílné interpretaci, neboť informace lze ukládat mimo typické pole i do jedné proměnné *typu unsigned int xx* s odpovídajícími vahami pro konkrétní signály. Zpracování pak probíhá logickými binárními součty nebo na základě tzv. procesu binárního maskování. Pokud se nezaznamená změna, program se vrací dle vývojového diagramu zpátky ke čtení a tím čeká na změnu. V opačném případě je na vstupní pin signálového procesoru generován skokový pulz a případně i kontrolní probliknutí LED.

6.3. Konfigurace vnitřních struktur dsPIC

Vnitřní struktury hlavního řídicího programu implementovaného v signálovém procesoru dsPIC jsou již o poznání realizačně mnohem obsáhlejší. Změnou kompilátoru pro odpovídající řadu procesorů se otevírají nové možnosti nastavování konfiguračních pojistek (kterými nebude tato práce zatěžována), ale také i dalších velmi užitečných registrů. Veškerá rozhraní I/O, využitá komunikační periferie SPI, I²C, USB, UART, vnitřní funkce PWM, TMR, ADC, INT... se musejí nejprve odpovídajícím způsobem podle technické dokumentace nakonfigurovat, tedy určit s jakými parametry a za jakých podmínek mají pracovat. Významná spousta z nich je označována pojmem „Remappable Peripherals“, tedy specifickou vlastností možnosti vnitřního přiřazení na vybrané piny.



Obrázek 6.2 - Princip „remapovatelnosti“ pinů // Detaily v datasheetu 210 - 217

6.3.1 Topologie I/O

Topologie I/O pinů bez speciálních funkcí opět zůstává ve svém základu zachována, nyní ovšem s rozšířením portů na 16 bitové od PORTA až PORTG, které dále doplňují registry TRISx (určuje směr komunikace I/O), ODCx (možnost otevřeného kolektoru), ANSELx (přepíná analogové / digitální budiče sběrnic) a LATx obdobný portu PORTx. Mezi výstupními registry LATx / PORTx vyplývá rozdíl zejména při čtení informace. Zatímco PORTx umožňuje volného přístupu k (digitálním / analogovým) hodnotám externě připojeným fyzicky na piny pouzdra procesoru, port LATx naopak vrací původně zapsané digitální výstupní hodnoty.

6.3.2 Konfigurace, inicializace SPI

SPI komunikace využívaná u záznamové MMC karty (typu Micro SD / SDHC) se nejprve podle tabulek v datasheetu přiřadí k odpovídajícím procesorovým pinům. Kanály SPI1, SPI3, SPI4 mají nezávisle remapovatelné všechny své vývody, zatímco SPI2 pouze povolovací Slave Select SS2. Pro využití tohoto kanálu se do RPnR<5:0> přiřazuje binární kombinace 001010. SCK2, SDI2, SDO2 jsou ve zmíněném pořadí pevně ukotveny na pinech RPG6-RPG8. Samotná inicializace rozhraní a poté následná komunikace probíhá více či méně náročněji podle propracovanosti vývojového prostředí s implementovanými knihovnami. Velmi pěkné uživatelské rozhraní nabízejí produkty firmy MikroElektronika včetně obsáhlých nápověd nebo živých diskuzních fór [15].

```

// Inicializace SPI modulu
SPI1_Init_Advanced(
    _SPI_MASTER, _SPI_8_BIT, _SPI_PRESCALE_SEC_1, _SPI_PRESCALE_PRI_64, _SPI_SS_DISABLE,
    _SPI_DATA_SAMPLE_MIDDLE, _SPI_CLK_IDLE_HIGH, _SPI_ACTIVE_2_IDLE);
// Smyčka dokud se rozhraní neinicializuje
while (Mmc_Init());

```

Obrázek 6.3 - Ukázka příkazu inicializace SPI v MikroC pro dsPIC

Obslužný program paměťové karty asi není nutné vzhledem k požadavkům zadání detailněji rozepisovat. Tabulka 6.1 stručně shrnuje všechny dostupné funkce knihoven pro velmi jednoduchou a intuitivní práci s SPI rozhraním. Zápis na MMC pro ukázkou zajistí rutina příkazem *unsigned int Mmc_Write_Sector (unsigned long sector, char *dbuff)*, přičemž *sector* určuje co a ukazatel *dbuff* kam, se má zapsat.

Tab. 6.1 - Dostupné funkce knihoven pro práci s SPI v MikroC

Mmc_Init	Mmc_Fat_Read	Mmc_Fat_Rename
Mmc_Read_Sector	Mmc_Fat_Rewrite	Mmc_Fat_MakeDir
Mmc_Write_Sector	Mmc_Fat_Append	Mmc_Fat_RenameDir
Mmc_Read_Cid	Mmc_Fat_Delete	Mmc_Fat_RemoveDir
Mmc_Read_Csd	Mmc_Fat_Write	Mmc_Fat_ChangeDir
Mmc_Multi_Read_Start	Mmc_Fat_Set_File_Date	Mmc_Fat_Exists
Mmc_Multi_Read_Sector	Mmc_Fat_Get_File_Date	Mmc_Fat_Dir
Mmc_Multi_Read_Stop	Mmc_Fat_Get_File_Date_Modified	Mmc_Fat_ReadDir
	Mmc_Fat_Get_File_Size	Mmc_Fat_Activate
Mmc_Fat_Init	Mmc_Get_File_Write_Sector	Mmc_Fat_ReadN
Mmc_Fat_QuickFormat	Mmc_Fat_Get_Swap_File	Mmc_Fat_Open
Mmc_Fat_Assign	Mmc_Fat_Tell	Mmc_Fat_Close
Mmc_Fat_Reset	Mmc_Fat_Seek	Mmc_Fat_EOF

6.3.3 Konfigurace, inicializace I²C

I²C rozhraní je komunikačně využíváno tříosým akcelerometrem ADXL345 skrze piny RA2 / RA3. Poloautomatická inicializace v uvedeném kompilátoru spočívá pouze v nastavení frekvence pomocí funkce *void I2Cx_Init (unsigned long scl)*, tedy modifikací jediného bitu I2CEN celého 16 bitového registru 2C1CON. Zbytek zůstává (stejně jako po resetu) zcela beze změn ve výchozím stavu:

- Pokračování v činnosti IDLE režimu
- IPMI režim zakázán
- 7 bitová slave adresa
- „Slew rate“ řízení povoleno (týká se reálného tvaru signálu)
- Potlačena všeobecná viditelnost

Inicializované rozhraní se před využitím aktivuje příkazem *void I2Cx_Start()*, který nevyžaduje žádné vstupní parametry a ani žádné nevrací. Instrukce lze také optimalizačně sdružovat ve smyslu zápisu *take = I2C1_Read(1)*, kdy jsou čtená data po bytech ukládána do proměnné a zároveň dochází k odesílání potvrzovacího signálu značeného jako ACK (Acknowledge). Zápis skrze sběrnici opět můžeme spojit v příkaz *error = I2C1_Write(data)* anebo rovnou vložit místo argumentu do podmínky. Proměnná *error* nese informaci při hodnotě 0 o bezchybném průběhu, zatímco při 1 o zaznamenané kolizi na sběrnici. Stavby čekání na uvolnění přenosového média podporuje blokační funkce *unsigned I2Cx_Is_Idle()*. Ukončení komunikace a uzavření kanálu je analogické ke spuštění - *void I2Cx_Stop()*.

6.3.4 Konfigurace, inicializace UART

Uživatelsky a servisně jednoznačně nejvyužívanějším prostředkem k akčním zásahům do průběhu a monitorování stavů řízení slouží bezdrátový přenos dat prostřednictvím rozhraní UART. Bluetooth modul BTM-182 je skrze hardwarové jumpery dvoudrátově propojen na procesorové piny RD0/RP64, RD11/RPI75. Vysílací pin funkce U1TX v zastoupení RPNR<5:0> se mapuje binární kombinací RPNR64 = 0b000001, přijímací pin U1RX (U1RXR<6:0>) hodnotou 1001011.

Inicializace se vstupním parametrem žádané baudovy rychlosti musí při vrchních mezích respektovat možnosti plynoucí z frekvence krystalu (uvedeno v datasheetu). Znění příkazu `void UARTx_Init(unsigned long baud_rate)` s výchozími parametry:

- Pokračování v činnosti IDLE režimu
- Defaultně Tx a Rx piny
- Režim „loopback“ zakázán (smyčky na pozadí)
- 8 bitová data, bez parity, jeden STOP bit
- Vysílání povoleno
- Generování přerušování pro příjem dat
- Mód detekce adres deaktivován

Rozšířená inicializace `UARTx_Init_Advanced` pak kromě omezené nabídky volby rychlosti definuje i počet bitů, vlastnosti parity, jeden nebo dva stop bity případně nízko či vysokorychlostní přenos. Z obsáhlejšího pojetí knihoven lze vybrat tři nejzákladnější `UARTx_Read()`, `UARTx_Write_Text (char * UART_text)` a také `UART_Data_Ready()`. Poslední zmíněná testuje, zda jsou přijatá data ve vyrovnávací paměti (bufery) připravena ke čtení a proto se díky návratové hodnotě efektivně využívá v argumentu podmínek IF nebo cyklů WHILE.

6.3.5 Konfigurace, Inicializace PWM

Pro atypicky definované vysokorychlostní sdružené PWM modulace se musí manuálně sáhnout mimo možnosti knihoven kompilátoru opět až k samotným registrům. Zajímavý bude zejména PWMCON s vybranými bity DTC (Dead-Time Control), DTCP (Dead-Time Compensation Polarity) - vše již významově popsáno dříve a DTCMPx - (volba kratšího / delšího PWMxL / PWMxH). Komplementární výstupní párové sdružení pinů PWM modulace se ovlivňuje dvoubitem PMOD<1:0> (kód 0b00) v registru IOCONx. Následující řízení pak již lze zpátky převést na funkce vývojového prostředí `PWM_Init()`, vyžaduje parametry - frekvence v Hz, PWM kanál, předdělička časovače, přiřazený časovač, `PWM_Set_Duty()` s definicí střídý, `PWM_Start()` a `PWM_Stop()`

6.3.6 Konfigurace, inicializace ADC

Pojem ADC zastřešuje elektronické obvody, diskrétně kvantizující spojitý analogový signál na digitální čísla. Ve schématickém zapojení řídicí jednotky vstupují do signálového procesoru dva analogové vstupy AN-Current od proudových senzorů INA214 (RE8/AN20, RE9/AN21) a jeden AN-Voltage z odporového děliče přímo na napájecí větvi (pin RB11/AN11). Základní konfigurační rutina ADC modulů probíhá typicky obdobným bezparametrickým příkazem *void ADCx_Init()* s defaultním nastavením:

- Jednokanálový nezávislý převod
- 10 bitové převodní rozlišení
- Formát dat typu unsigned integer
- Automatický převod
- $V_{\text{Ref}+}: AV_{\text{dd}}, V_{\text{Ref}-}: AV_{\text{ss}}$
- Zpracování v režii hodinových instrukčních cyklů
- Převodní taktování: $32 \cdot T_{\text{cy}}$
- Auto-sample Time: $31 T_{\text{AD}}$

Pro náročnější potřeby aplikace pak existuje rozšířená funkce *ADCx_Init_Advanced*, která variabilněji dokáže zasahovat jednotlivě i do výše uvedených bodů. Ostatní nabízené příkazy nejsou nezbytně nutné, a proto stačí znát už jen princip čtení hodnot *adc_value = ADC1_Read(10)* // čtení analogové hodnoty z modulu ADC1, kanál 10.

6.3.7 Konfigurace externích přerušení

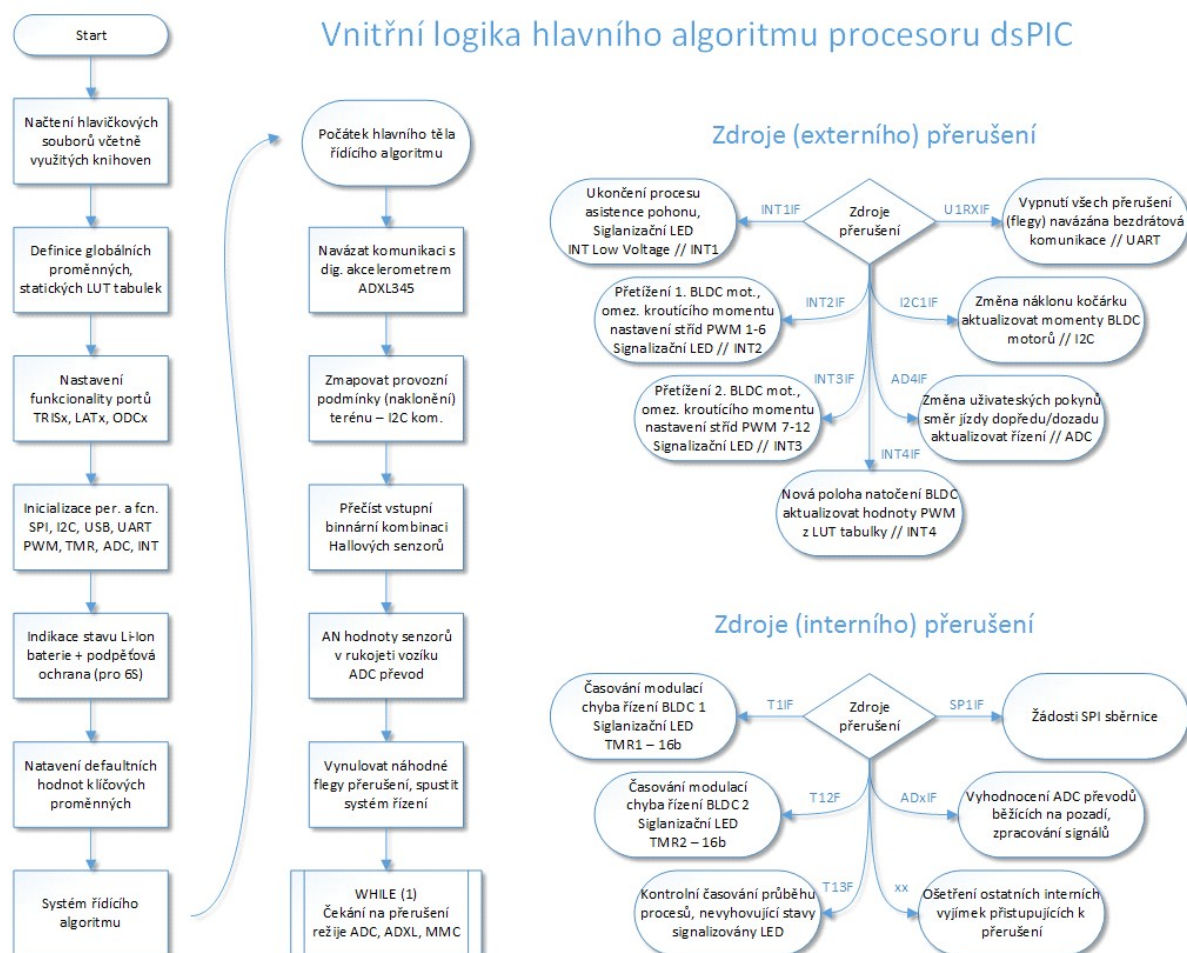
Specifická vlastnost některých pinů umožňuje vnějším zásahem do hodnot přiložených napětí vyvolat stav softwarového přerušení, tedy okamžitý vynucený skok na programovou adresu 0x600, kde se nacházejí konkrétní instrukce, co se má bezodkladně vykonávat. Využitý signálový procesor zahrnuje 5 nezávislých signálů přerušení, přičemž INT0 je pevně svázan s pinem RD0 a zbylé volně remapovatelné. Na pin RB7/ RPI39 schématického zapojení měniče se napojuje skrze 74HC1G31 logický součet přerušení INT Low Voltage obou třífázových můstků - volba kanálu

externího přerušení INT1R<6:0> s kódem 0100111. Stavy provozních přetížení BLDC motorů po digitalizaci zpětnovazebními zesilovači přejímají piny RB0/RPI32 a RB1/RPI33 s nastavením INT2R = 0b0100000, INT3R = 0b0100001. Poslední volný plovoucí pin externího přerušení RG15/RP127 zbývá pro souhrnné přerušení od změn poloh šesti Hallových senzorů vyhodnocované pomocným procesorem PIC16LF1559 - INT4R = 0b1111111. Skoky do podprogramu jsou podmíněny manuálním nulováním flagů IFSx a inicializačním povolením IECx s vektorem globálního přerušení GIE. Sedmi úrovně priority přerušení spadají v tabulce Interrupt Vector Table (IVT) mezi 118 možností vyhodnocovaných registrem IPCx. Bit INTxEP registru INTCONx definuje reakci na náběžnou či sestupnou hranu signálu.

6.4. Logika hlavního řídicího algoritmu

První řádky kódu vkládají do hlavního těla algoritmu hlavičkové soubory využitých knihoven z instalační sady kompilátoru a externě psané funkce. Po nich neprodleně následuje inicializace proměnných globálního charakteru, viditelné skrze celé tělo programu, včetně statických polí (LUT tabulek). Struktura podprogramů psaných zejména v beznávratových funcích *void* zaujímá významově hierarchicky pevné rozložení podle své důležitosti. Ve vývojovém prostředí platí exaktní systém viditelnosti jedné funkce z druhé pouze v posloupnosti (tedy kódu) dříve psaném. S jistou výhodou se tedy ukazuje strukturovat rutiny přerušení (externí i od vnitřních procesů) hnedka nad hlavní tělo *main*, aby byly softwarově přístupné všechny výše uvedené části kódu. Po konfiguračních, definičních a základních inicializačních procesech vstupuje chod programu do hlavní funkce *main*, ve které již stabilně setrvává (vyjma přerušení) po celou dobu řízení. První volanou funkcí musí nutně být nastavení funkcionality I/O všech vnějších zapojených portů. Chybná kombinace binárního slova v registru TRISx znefunkční nebo v horším případě definitivně poškodí celou jednotku. Dalším funkčním blokem podle uvedeného vývojového diagramu přicházejí na řadu periferie (SPI, I²C, USB, UART) a vnitřní funkce (PWM, TMR, ADC, INT), které se již v předchozích kapitolách podrobněji diskutovaly. Před zahájením samotného cyklu řízení probíhá detekce provozního stavu baterie (nastaveno pro články Li-Ion 6s) aby nedocházelo k jejímu případnému poškození vlivem podvybití. Hodnota je snímána

procesorovým AD převodníkem a komparována softwarově s povolenými mezemi nebo případně jsou dostupné i digitalizované signály od operačních zesilovačů třífázových můstků.



Obrázek 6.4 - Zjednodušené blokové schéma softwarového algoritmu řídicí jednotky

Logika hlavního jádra programu vychází z místa, kde začínají fyzicky vznikat pro aplikaci řízení elektricky asistovaného pohonu vozíku hodnotné signály a také již samotný proces řízení. Po úspěšném navázání spojení s tříosým digitálním akcelerometrem ADXL345 se ihned začne dvourozměrně mapovat aktuální sklon terénu, který je I²C sběrnici sekvenčně vyčítán. Navazujícími vstupními parametry vytvářejícími dynamické poziční tabulky jsou stavy Hallových sond, tedy vzájemná natočení rotorů a statorů obou bezkartáčových motorů. V interakci s uživatelskými pokyny ještě dále do algoritmu vstupují hodnoty senzorů z rukojeti kočárku reprezentující přímý

požadavek k charakteru jízdy. Souhrn informací po vstupním vynulování flagů přerušení zpracovává cyklicky nekonečná smyčka WHILE, ve které se program již bude nadále držet.

Výpočetně efektivnějšímu ale také mnohem plynulejšímu chodu aplikace velmi prospívá koncept řízení založený primárně na výhodách přerušení. Jinými slovy signálový procesor se nezabývá opakovaně podněty, které nejsou v daný moment důležité. Bylo by nemístné s vysokou reží například sledovat natočení obou BLDC motorů, když si v případě změny mohou samy vyvolat skok do podprogramu pomocí pinu externího přerušení. Tyto signály lze primárně podle původu zdroje kategorizovat na externí a interní. Externí zasahují do procesu řízení tzv. zvenčí a jedná se o obdoby INTx, I²C vstupující fyzicky přes piny pouzdra součástky, ale také žádost o navázání vnější bezdrátové komunikace. Vnitřní naopak zachytávají události od ADC převodníků, kontrolních časovačů...

Pro nastínění podprogramů lze uvést i situaci s digitálním tříosým akcelerometrem. S inicializací nejprve došlo k počátečnímu vyčtení výchozích hodnot a také k vnitřnímu nastavení chování součástky. Opět není třeba ji trvale zatěžovat dotazy ohledně aktuální polohy sklonu, pokud její konstrukce umožňuje v případě definované změny o jistý úhel automatického generování přerušovacího signálu. Obdobné situace přeneseně platí i pro zaznamenané vybití akumulátorů, přetížení jednoho nebo obou BLDC motorů, změnu uživatelských pokynů na směr jízdy (dopředu / dozadu / zatočit)...

Zdroje interního přerušení pracují s vnitřními, zvenčí nepřístupnými signály. Jedná se zejména o časovače podporující chod BLDC motorů. Jejich průběžným modifikováním lze zajistit konstantní žádanou rychlost kočárku a upravovat provozní parametry. Pokud přerušení od Hallových senzorů BLDC motorů začne svým natočením žádat o novou kombinaci PWM modulací dříve, než dojde k povolení od přiděleného časovače TMRx, docházelo by fyzicky k permanentnímu zrychlování. Technické omezení krouticího momentu, tedy snížení výkonu spočívá v úpravě PWM stříd. Obdobná situace týkající se stříd ovšem platí i v opačném případě, kdy naopak motory pro udržení jistého momentu nestíhají sledovat takt časovačů. Celý proces řízení probíhá zpětnovazebními smyčkami, tedy následným vyhodnocováním reakcí na vstupní akci.

Závěr

Základním úkolem diplomové práce bylo navrhnout a realizovat vhodný hardware, s odpovídajícím softwarovým vybavením pro pokročilé řízení pohonu elektricky asistovaného kočárku. Tyto cíle byly v plném rozsahu splněny. Informace z teoretické části později posloužily při praktické realizaci a dimenzování popsanych obvodů včetně vývoje programových struktur.

V praktické části je představen koncept mechanického rozmístění komponent včetně popsání a realizace z diskrétních elektronických součástek. Třífázový můstek se vyvíjel podle potřeb vycházejících z aplikace elektricky asistovaného pohonu kočárku a později byl propojen k provoznímu testování s řídicí jednotkou. Ta externě snímá signály Hallových sond a v interakci s uživatelskými pokyny a tříosým digitálním akcelerometrem ADXL345, generuje sdružené pulzně šířkově modulované signály pro duální třífázový můstek. Obvod třífázového můstku je výkonovým mezistupněm mezi řídicí jednotkou a bezkartáčovými stejnosměrnými motory.

Následující kroky by mohly nyní přednostně směřovat k vývoji v oblasti bezdrátového ovládání, které nabízí spousty zatím hlouběji neprobádaných možností. Velmi perspektivní se jeví programová implementace do smartphonů, zobrazující veškeré provozní stavy od zatížení jednotlivých bezkartáčových motorů, krouticí momenty, odebírané proudy, nabití baterie až po fyzický náklon kočárku... Aplikace by ale také mohla obecně vstupovat do otevřeného procesu řízení a tím přinést nové možnosti. Jednotka implementuje podporu Micro SD/SDHC karty, což směřuje k možnostem volitelného záznamu veškerých zajímavých provozních dat a pozdějšímu vykreslování grafů charakteru jízdy.

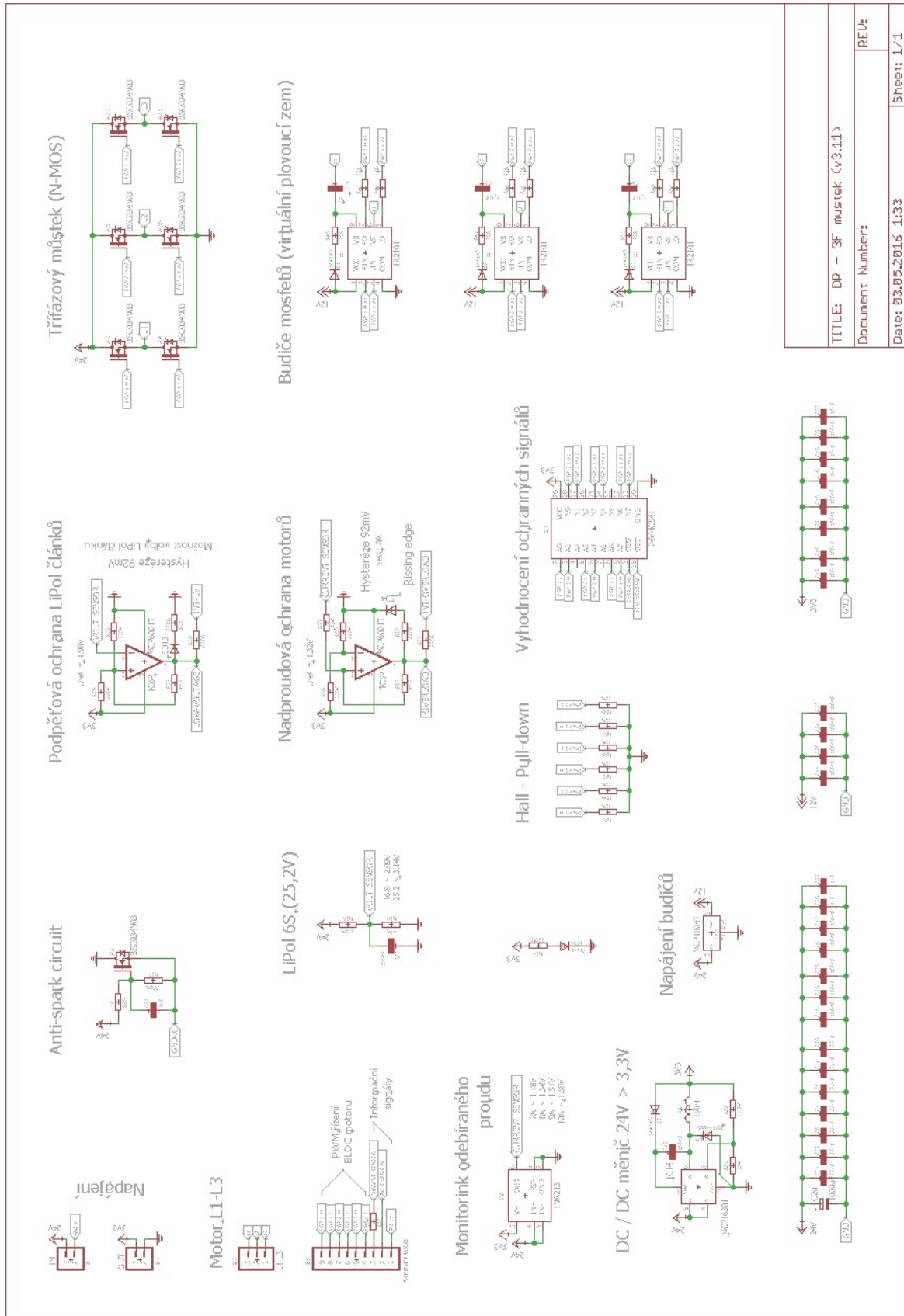
Reálné provozní nasazení aplikace bude vyžadovat, vzhledem k charakteru venkovního počasí, zajistit určitou míru krytí. Ochranné obaly (pouzdra) zpravidla nebývají samospasitelné a proto bude využito transparentního laku Plastik od firmy Elchemco. Tento prostředek (s UV indikátorem) je primárně určen pro speciální povrchovou úpravu desek plošných spojů. Po vytvrzení vytváří lesklý, pružný, ochranný film odolný proti kyselinám, solím, alkáliím, vlhkosti, houbám, korozivním výparům, tepelnému zatěžování a drsným provozním podmínkám.

Seznam použité literatury

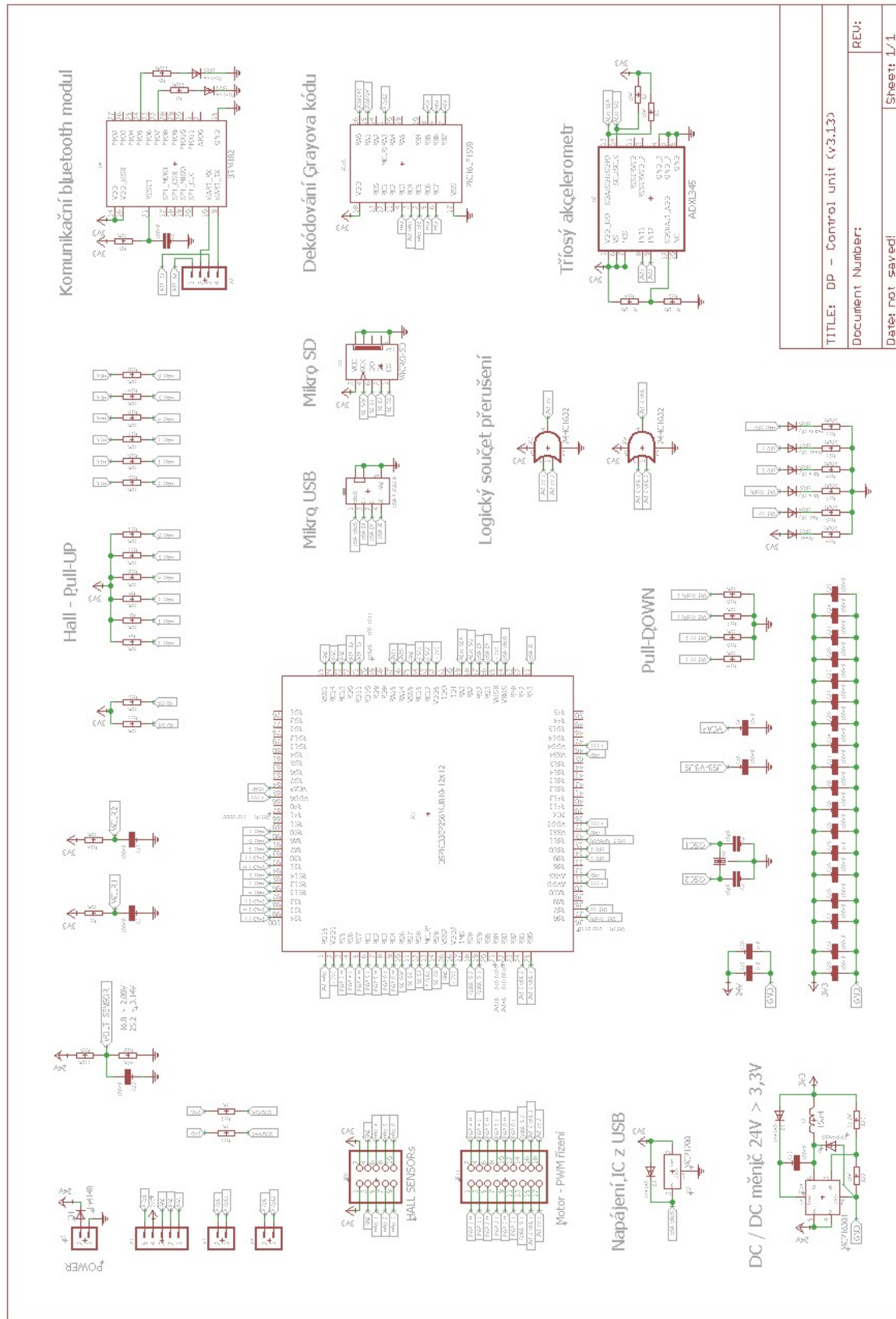
- [1] Elektro časopis: Bezkartáčový stejnosměrný motor [online] - [cit. 2015-10-06], URL:
<<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/bldc-aneb-dc-motor-s-nulovymi-naklady-na-udrzbu--10016>>
- [2] Vinklarek: Používání akumulátorů Li-Pol [online] - [cit. 2015-10-06], URL:
<<http://www.vinklarek.cz/NavodLipol.htm>>
- [3] Moje Modely: Li-Pol baterie [online] - [cit. 2015-10-07], URL:
<http://www.mojemodely.cz/clanky/prechod_na_lipo.htm>
- [4] Digi-Key [online], 3-Phase Motor Control - [cit. 2015-10-17], URL:
<<http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2011/oct/3phase-motor-control-renesas-floating-point-rx-mcu-series-advantage-over-fixed-point>>
- [5] RCTankCombat [online], H-můstek, ovládání motoru - [cit. 2015-11-17], URL:
<<http://www.rctankcombat.com/articles/speed-control>>
- [6] Sos electronic: Spínaný zdroj za pár minut [online] - [cit. 2015-12-13], URL:
<<http://www.soselectronic.cz/?str=962>>
- [7] Avdweb: Antispark circuit [online] - [cit. 2015-11-14], URL:
<<http://www.avdweb.nl/solar-bike/electronics/motor-controller.html>>
- [8] Infineon: Power-MOSFET [online] - [cit. 2016-03-14], URL:
<<http://www.tme.eu/cz/Document/dabd42fa0ab729de94fd5795b3d8c64e/BSC034N03LSG-DTE.pdf>>
- [9] Texas Instruments: INA214 [online] - [cit. 2016-03-18], URL:
<<http://www.ti.com/product/INA214/datasheet>>
- [10] Wikipedie: Elektromagnetická kompatibilita [online] - [cit. 2016-03-21], URL:
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A1_kompatibilita>
- [11] I2Cdevlib: ADXL345 3-axis accelerometer [online] - [cit. 2016-03-25], URL:
<<http://www.i2cdevlib.com/devices/adxl345#source>>

- [12] Microchip: dsPIC33EP256MU810 [online] - [cit. 2016-04-05], URL:
<<http://www.microchip.com/wwwproducts/en/dsPIC33EP256MU810>>
- [13] Wikipedie: Grayův kód [online] - [cit. 2016-04-07], URL:
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Gray%C5%AFv_k%C3%B3d>
- [14] Microchip: PIC16lf1559 [online] - [cit. 2016-04-14], URL:
<<http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC16LF1559>>
- [15] MikroE: Online Help [online] - [cit. 2016-05-10], URL:
<<http://www.mikroe.com/mikroc/pic>>
- [16] Katalogové listy součástek firem Microchip, ST, NXP.
- [17] Ďaďo, S., Kreidl, M.: Senzory a měřicí obvody. Vydavatelství ČVUT Praha 1999
- [18] Pinker, J.: Mikroprocesory a mikropočítače. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 159 s. ISBN 80-730-0110-1
- [19] Google.cz: Obrázky [online] - [cit. 2016-05-10], URL: <<https://www.google.cz>>
- [20] Plíva, Z., Drábková, J.: Metodika zpracování diplomových, bakalářských a vědeckých prací na FM TUL. Liberec: FM TU v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-189-3

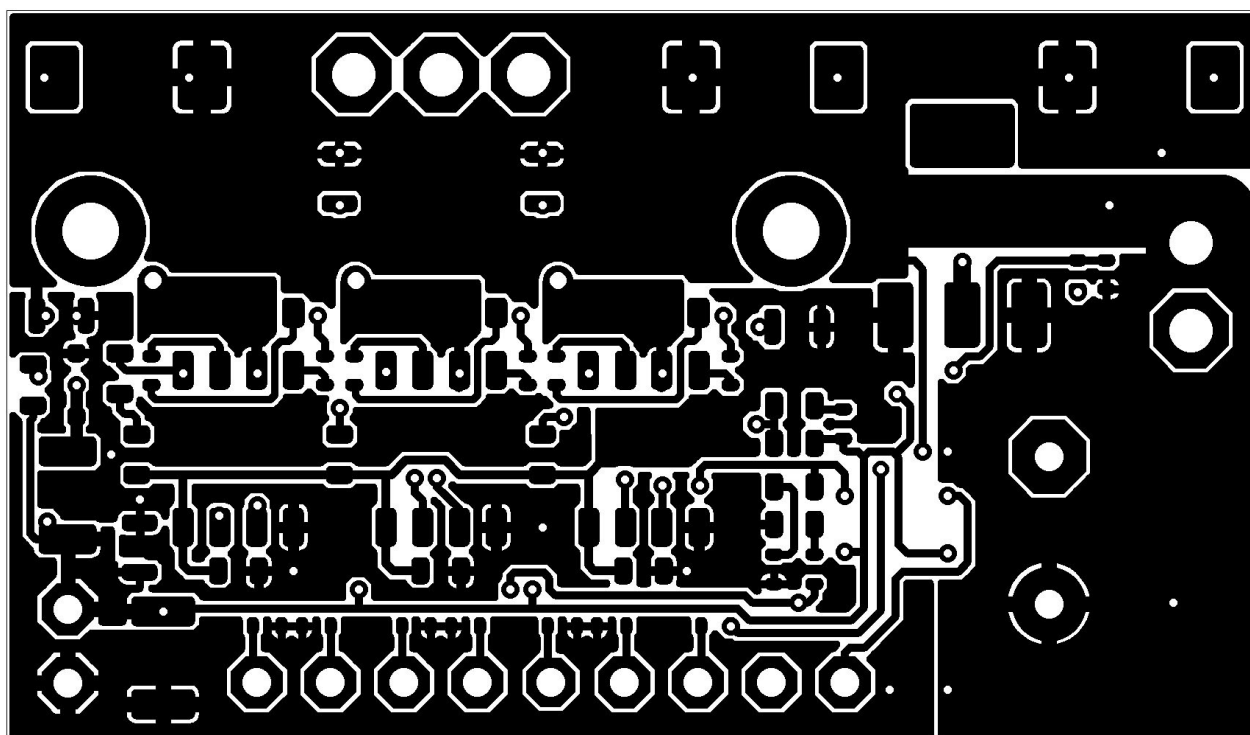
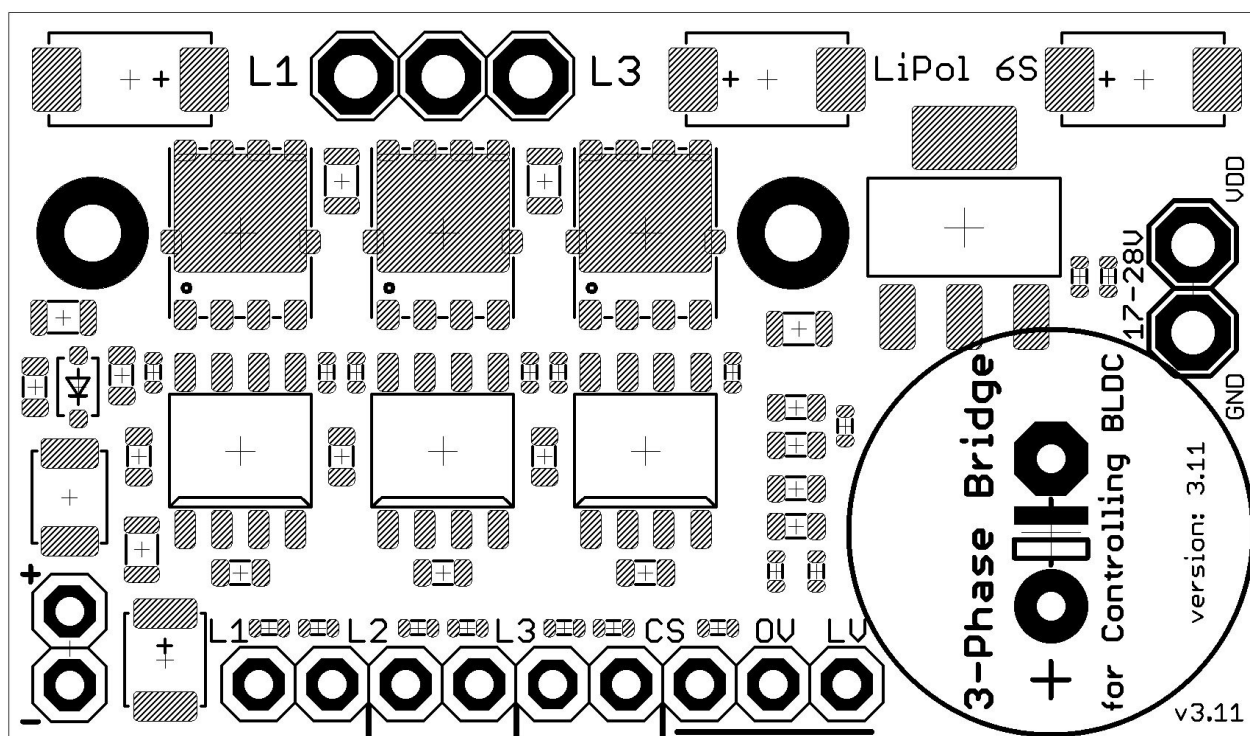
Grafické přílohy diplomové práce



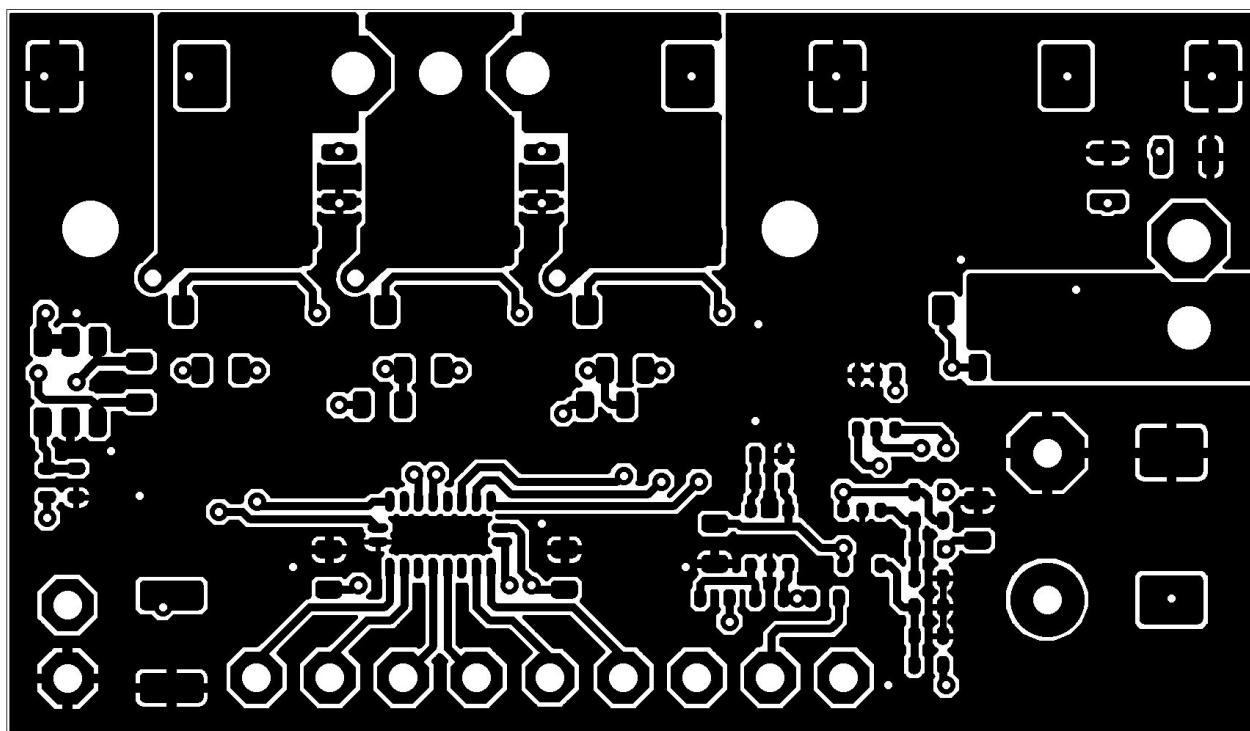
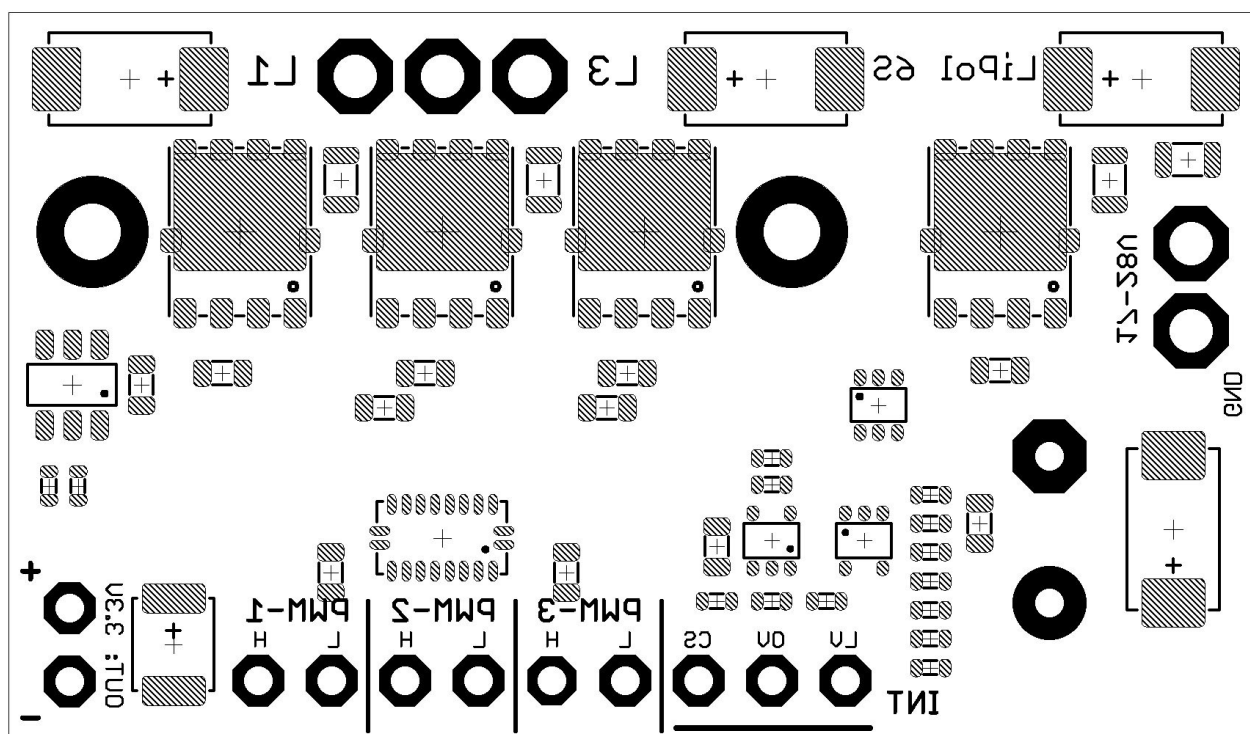
Ucelený schematický návrh třífázového můstku



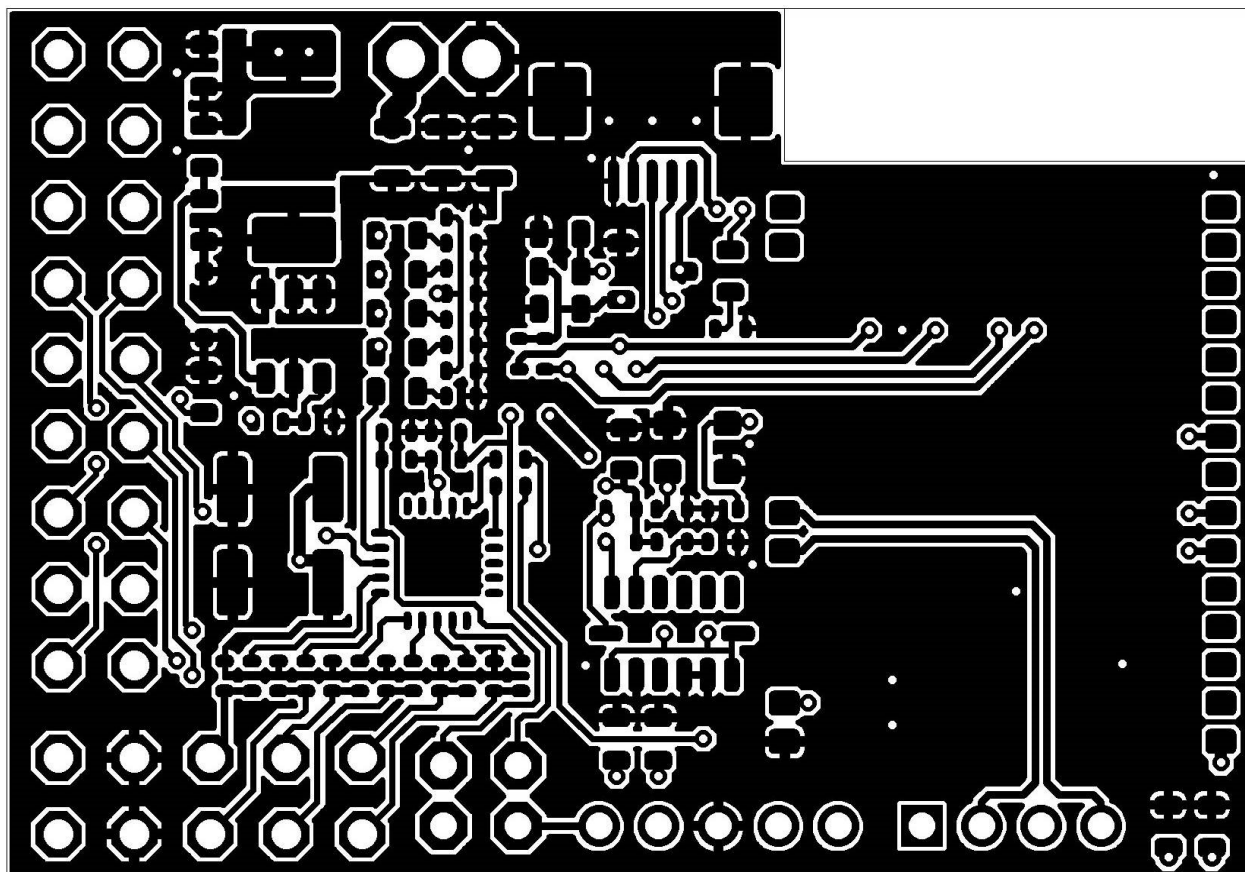
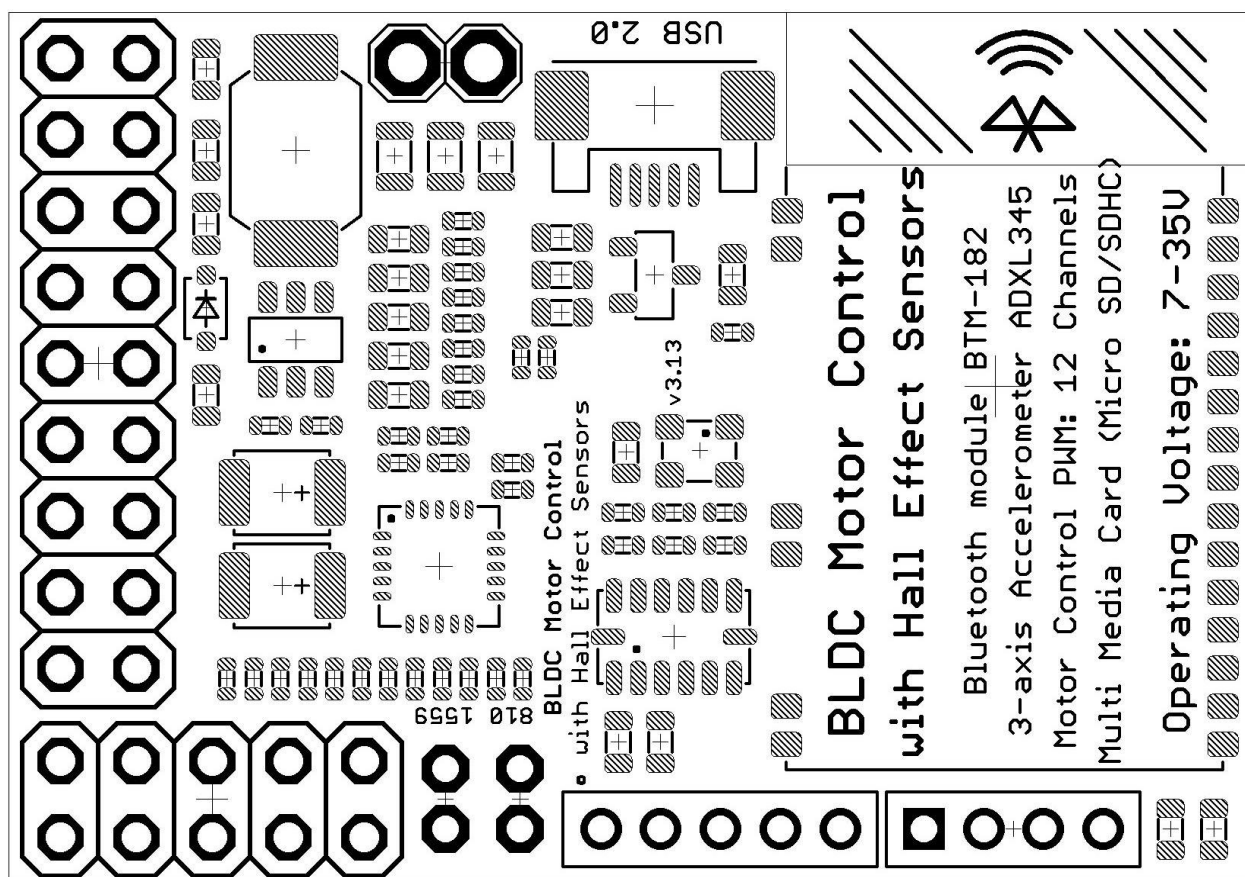
Ucelený schematický návrh centrální řídicí jednotky



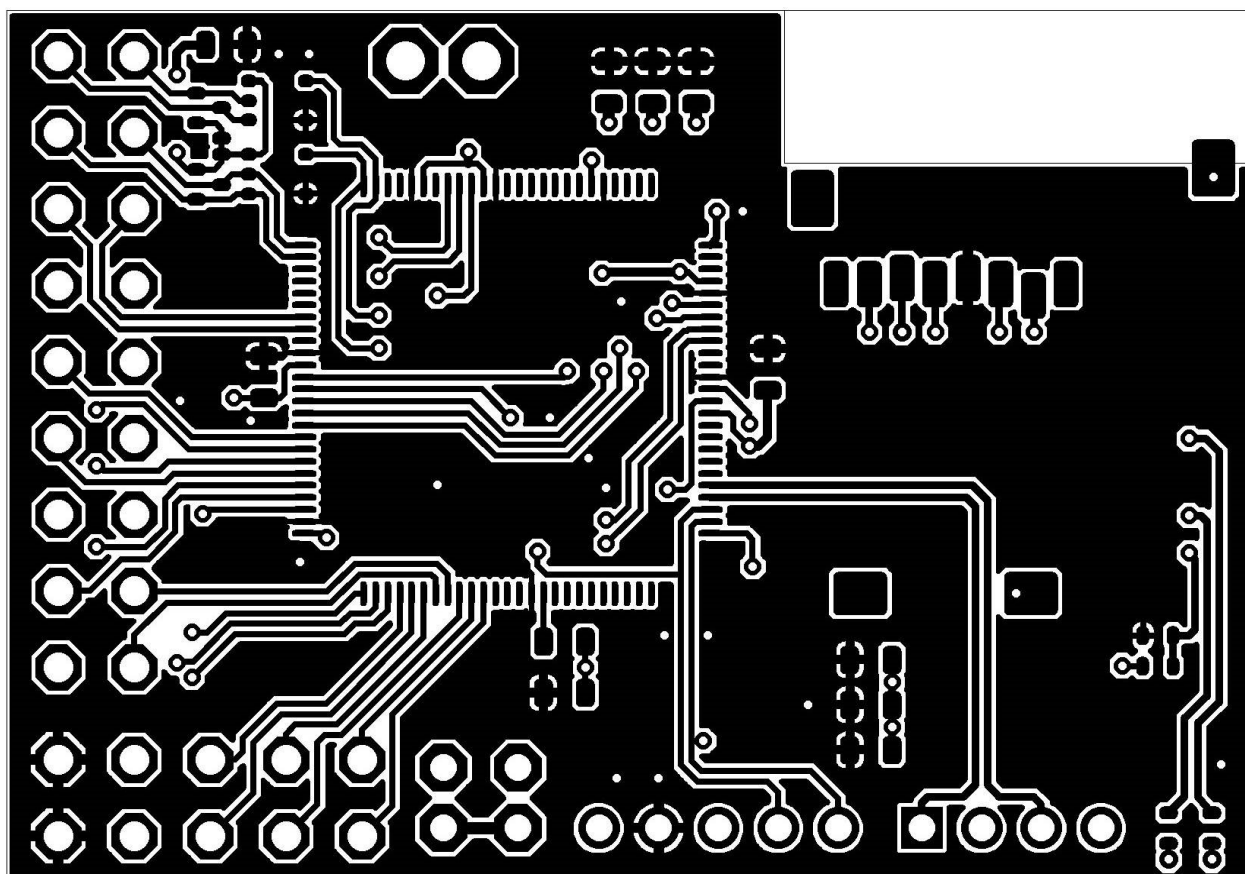
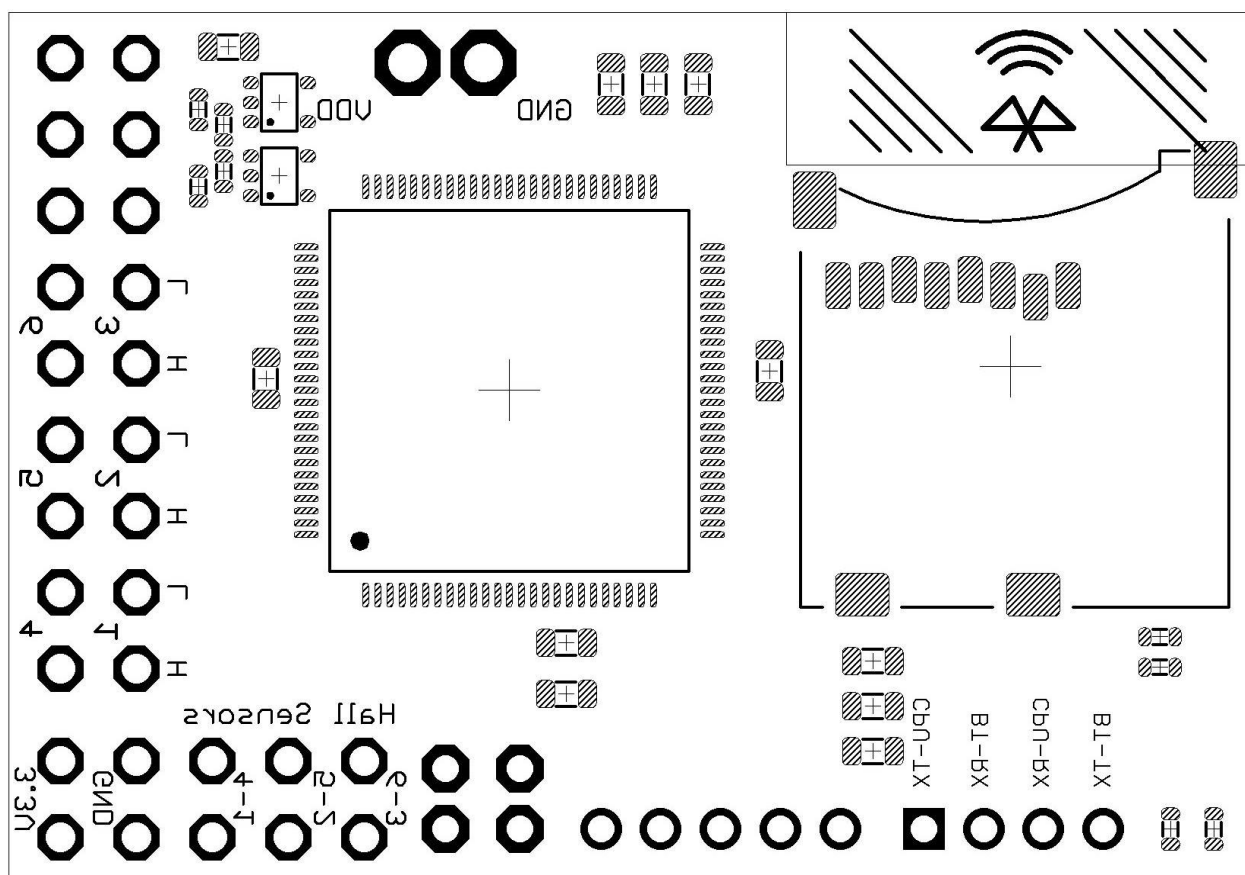
Osazovací plán, osazovací obrazec (3F-Bridge, strana TOP)



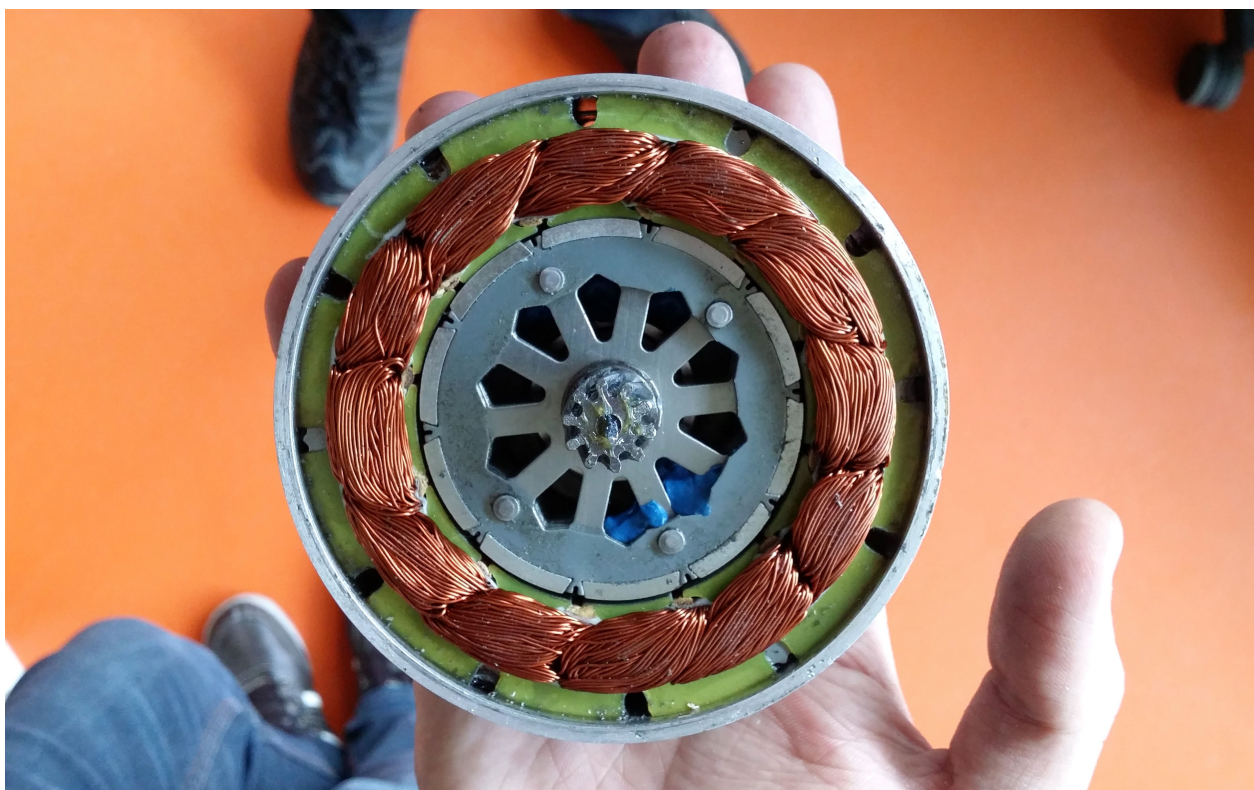
Osazovací plán, osazovací obrazec (3F-Bridge, strana BOTTOM)



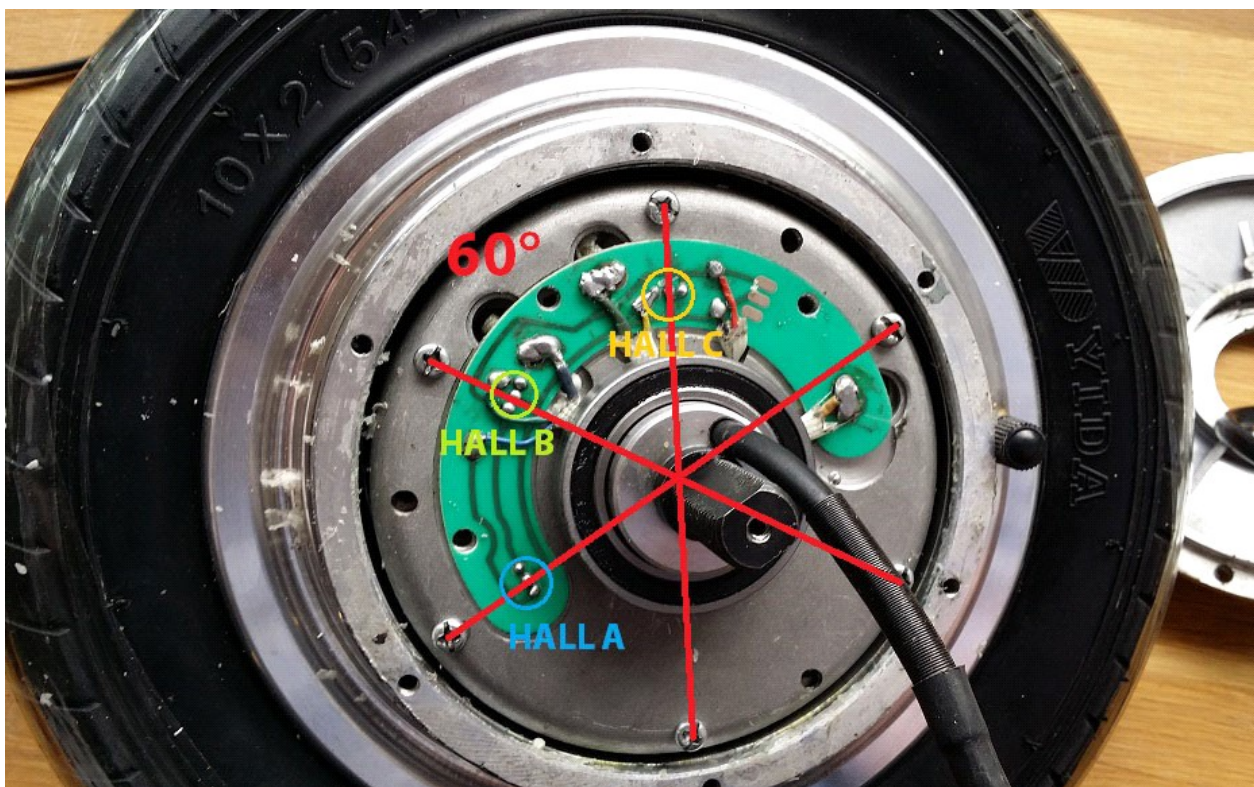
Osazovací plán, osazovací obrazec (Control Unit, strana TOP)



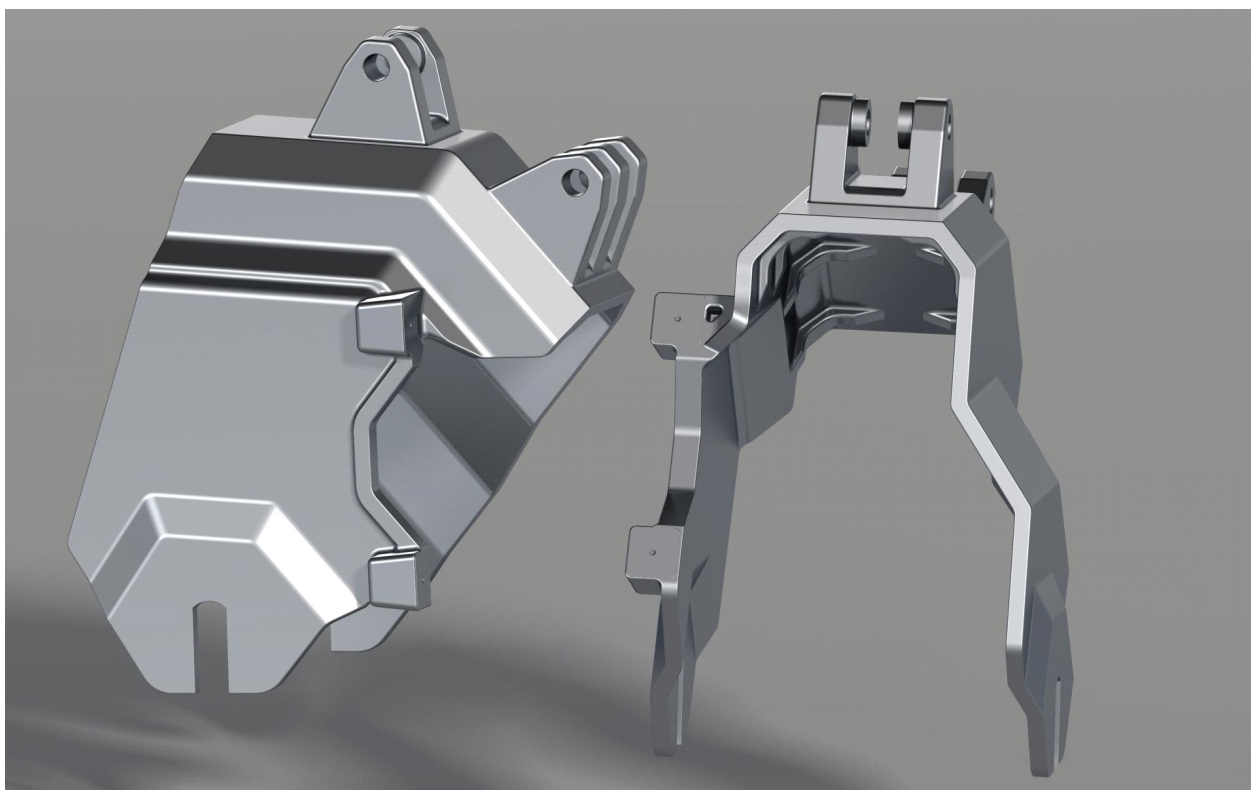
Osazovací plán, osazovací obrazec (Control Unit, strana BOTTOM)



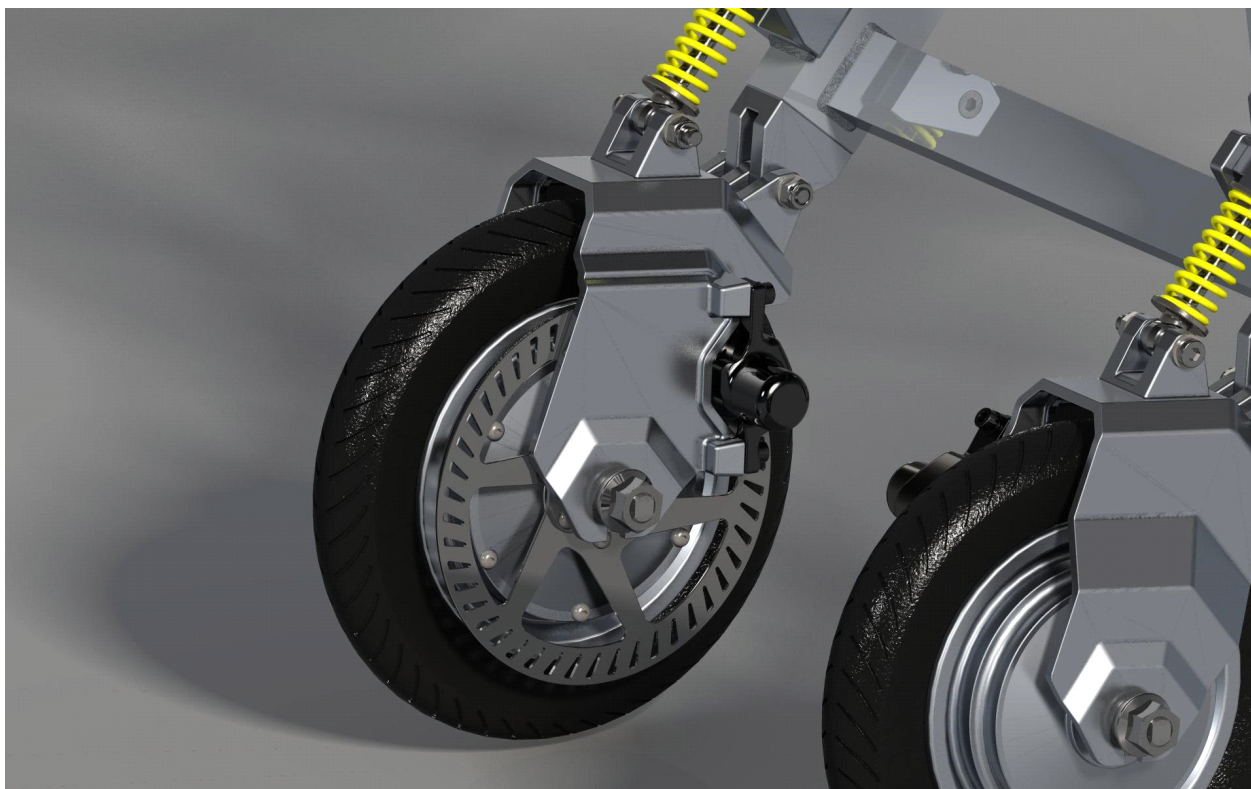
Vnitřní struktura BLDC motorů // Autor: Ing. Pavel Jandura, Ph.D



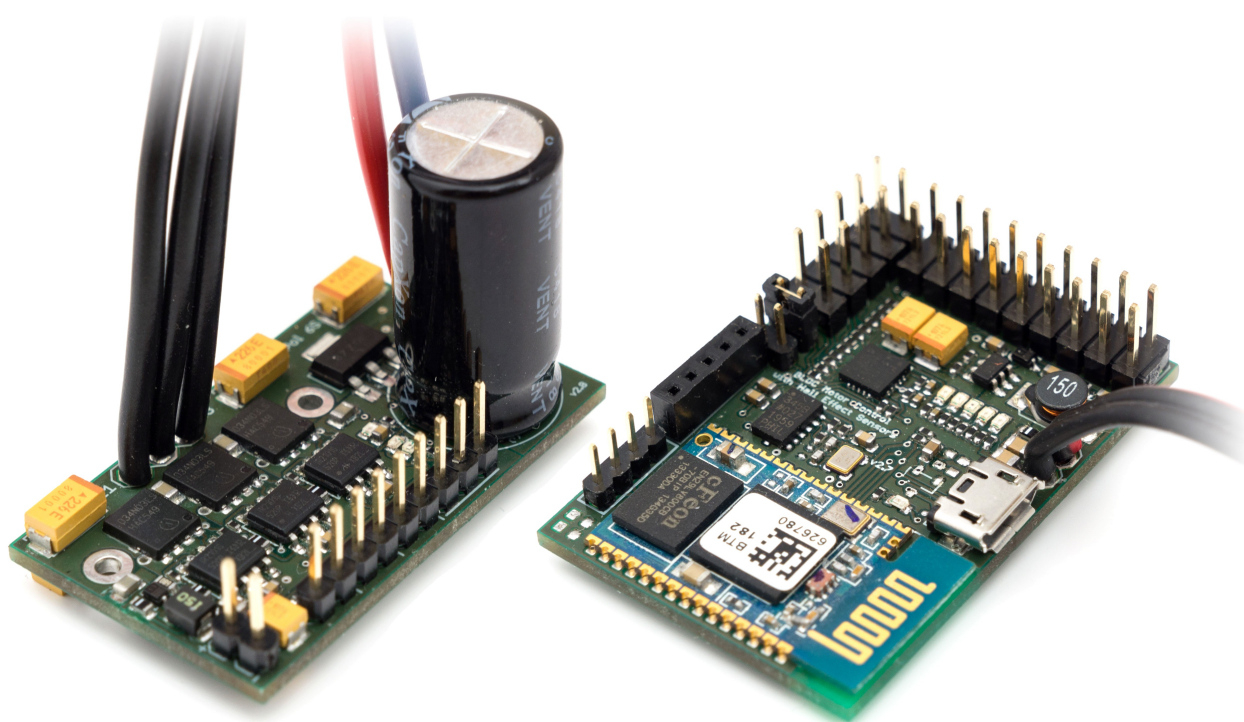
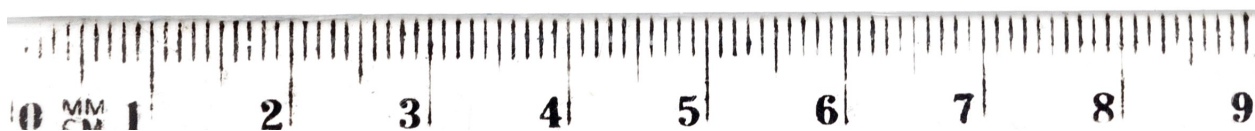
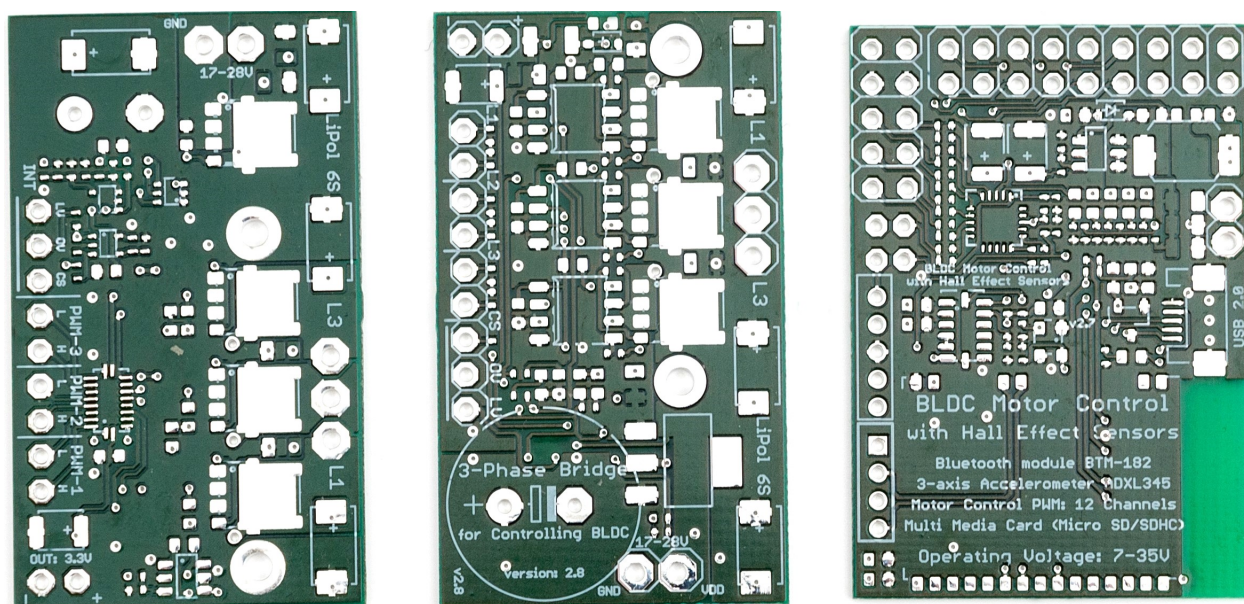
Poloha Hallových senzorů // Autor: Ing. Pavel Jandura, Ph.D



Levá a pravá kapsa pro konstrukční úchyt BLDC motorů // Autor: Bc. Martin Dvořák, FS TUL, 2014



Mechanická konstrukce kočárku včetně zabudování BLDC motorů // Autor: Bc. Martin Dvořák, FS TUL, 2014



Finální podoba realizovaného hardwaru